

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.762:620.22-419:669.25

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

Алмазный инструмент для резки высокоармированного железобетона с дисперсно-упрочненной наночастицами металлической связкой

Описаны две дисперсно-упрочненные наночастицами WC и ZrO₂ связки, применяемые при производстве алмазного инструмента для резки железобетона. Исследован характер распределения наночастиц по металлической матрице, определены физико-механические и трибологические свойства связок. Показано, что использование дисперсно-упрочненных связок приводит к росту ресурса инструмента до 60 % без снижения скорости резания.

Ключевые слова: *связки для алмазного инструмента, дисперсно-упрочненные материалы, алмазный отрезной сегментный круг, резка железобетона.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время режущий алмазный инструмент находит широкое применение во многих отраслях промышленности. В роли металлических связок для такого инструмента обычно используют Co, Fe, Ni, Cu, Sn [1—6] и другие металлы и их сплавы, при этом в зависимости от термостойкости алмазов, их концентрации в алмазоносном слое и типа обрабатываемого материала подбирают связку с заданным комплексом механических и трибологических свойств. В настоящей статье предложен способ повышения указанных свойств связок для алмазного режущего инструмента, сущность которого заключается во введении в связку упрочняющих наночастиц. Данный подход успешно развивается в Национальном исследовательском технологическом университете “Московский институт стали и сплавов” совместно с ЗАО “Кермет” (г. Москва) последние шесть лет, что нашло отражение в патентах [7—11]. Как известно [12], дисперсно-упрочненными композиционными материалами называют материалы, содержащие искусственно вводимые в них равномерно распределенные упрочняющие частицы, не взаимодействующие активно с матрицей и не растворяющиеся в ней значительно

© А. А. ЗАЙЦЕВ, Д. А. СИДОРЕНКО, Е. А. ЛЕВАШОВ, В. В. КУРБАТКИНА, В. А. АНДРЕЕВ, С. И. РУПАСОВ,
П. В. СЕВАСТЬЯНОВ, 2010

вплоть до температуры плавления, улучшающие свойства металлов и сплавов. Наиболее эффективное упрочнение происходит, когда содержание упрочняющей фазы не превышает 3—15 % (по объему), размер частиц составляет 0,01—0,05 мкм, среднее расстояние между ними — 0,1—0,5 мкм. Как показывают теоретические расчеты и многочисленные экспериментальные данные, в сплавах с дисперсно-упрочненной структурой значительно возрастают твердость, ударная вязкость, прочность на растяжение, изгиб и износостойкость. В [13] рассмотрено три основных упрочняющих фактора, объясняющих увеличение механических свойств сплава при введении твердых наночастиц в объем металлических сплавов:

— эффект несения (перераспределения) нагрузки упрочняющими частицами (f_1); основные зависимости для f_1 выведены в [14—16];

— упрочнение, связанное с увеличением плотности дислокаций из-за разницы коэффициентов термического расширения между матрицей и упрочняющими частицами (f_d); уравнение для f_d выведено в [17];

— упрочняющий эффект Орована, связанный с торможением движения дислокаций на твердых частицах (f_{Orowan}); упрочнение, связываемое с этим фактором, описывается уравнением Орована-Ашби (Orowan-Ashby) и приведено в [18].

При изготовлении алмазного инструмента есть ограничения по максимальной температуре спекания, обусловленные интенсивной графитизацией алмаза при температурах выше 900 °С. Традиционные методы упрочнения связки, заключающиеся во введении в нее микронных порошков (например WC) в количестве 10—20 % (по массе), требуют увеличения температуры спекания, в то время как при использовании наноразмерных частиц для эффективного упрочнения связки достаточно всего 2—6 % (по массе), что практически не влияет на температуру спекания сплава.

Ранее авторами [19—21] на примере связок на основе кобальта, никеля и железа было показано позитивное влияние добавки небольшого количества наночастиц на свойства связок и служебные характеристики алмазного инструмента.

Поэтому целью данной работы было исследование влияния наночастиц на структуру и свойства медных связок и алмазного инструмента в целом.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления образцов брали порошковую шихту системы Cu—Co—Fe—WC (далее по тексту связка М), применяемую при производстве сегментов для алмазных кольцевых сверл (АКС), и шихту системы Cu—Co—Fe—Sn (далее по тексту — связка К), применяемую при производстве сегментов для алмазных отрезных сегментных кругов (АОСК). Свойства нанопорошков, используемых в работе, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства нанопорошков плазмохимического метода получения

Наночастицы	d , нм	$S_{\text{уд}}$, м ² /г	$\rho_{\text{нас}}$, г/см ³	Примеси, % (по массе)	Фазовый состав
ZrO ₂	10—40	10—14	0,5	0,1—0,05	тетрагональная и моноклинная фазы ZrO ₂
WC	20—100	6—9	2,4	до 5 %	WC, W ₂ C

Исходные порошковые смеси готовили в центробежной планетарной мельнице МПП-1 (Россия) при контролируемом соотношении массы шаров и массы смеси и варьируемой длительности обработки. Полученную шихту с различным содержанием добавок нанопорошков спекали при температуре $T_c = 700\text{—}900\text{ }^\circ\text{C}$. Образцы для определения механических и трибологических свойств готовили по технологии горячего прессования в инертной атмосфере на установке DSP-475 “Dr Freetch” при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$ для связки К и при $850\text{ }^\circ\text{C}$ для связки М, давление прессования $p = 350\text{ кг/см}^2$. Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной сервогидравлической машине марки LF-100kN фирмы “Walter & Bai AG” (Швейцария) по ГОСТ 18228—94. 7

Измерения твердости выполнены на твердомере марки TP 5006 по шкале В (ГОСТ 20017). Плотность определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 25281 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 $\rho_{\text{адд}}$ — аддитивная плотность образца, г/см^3 ; m — масса образца, г; m_{V21} — масса связки в образце, г; ρ_{V21} и $\rho_{\text{нанодоб}}$ — плотность связки и нанодобавки соответственно, г/см^3 .

Пористость образцов рассчитывали по формуле

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

где ρ — реальная плотность образца, г/см^3 .

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

Трибологические испытания проводили на автоматизированной машине трения “Tribometer” фирмы “CSM Instruments” по схеме неподвижный шарик—вращающийся диск. Условия испытаний следующие: контртело — шарик Al_2O_3 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. 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), мм^2 ; L — пробег, м; F — нормальная нагрузка, Н.

Испытания АОСК проводили на мостовом отрезном станке “Алмаз” (Россия). Основные параметры резания представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры резания

Армирование бетона, % (по объему)	Глубина реза за проход, мм	Частота вращения, мин^{-1}	Нагрузка по току, А	Охлаждение
6	4	1500	8—10	водное, 10 л/мин

Обрабатываемым материалом был монолитный бетон марки М400 с гранитным наполнителем и средним армированием 6 % (по объему) (арматура № 12 и № 24); диаметр АОСК — 500 мм; посадочный диаметр — 50, 30 сегментов геометрией 40×4,0×9,0 мм на круг.

Испытания АКС проводили на сверлильной машине dm28 (фирма “Eurodima”, Австрия); диаметр АКС — 102 мм, по 9 сегментов размером 23×4×7 мм на сверло. Режим испытания: частота вращения сверла — 300 мин⁻¹; ток двигателя при испытании — 8 А (поддерживали постоянным); охлаждение водное — 10 л/мин. Обрабатываемый материал — тот же бетон с армированием 7—12 % (по объему); та же арматура.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Важной задачей при разработке дисперсно-упрочненных материалов является нахождение эффективного способа введения наночастиц в сплав. Применительно к сплавам, получаемым методами порошковой металлургии, перспективным способом является смешение исходной порошковой шихты сплава с упрочняющей фазой в смесительных устройствах типа планетарной центробежной мельницы (ПЦМ). В процессе обработки смеси в ПЦМ происходят множественные соударения размольных тел (обычно это стальные или твердосплавные шары) между собой и стенками барабана, что приводит к эффективному перемешиванию компонентов смеси, а также к так называемому механическому активированию. Под механическим активированием понимают увеличение активности шихты в процессах спекания или химического взаимодействия за счет увеличения поверхности частиц (или межфазной поверхности в случае многокомпонентных систем), а также за счет интенсивной упругой и пластической деформации, увеличения дефектности кристаллической решетки. В данной работе механическое активирование является сопутствующим процессом, положительно влияющим на спекание смесей. Эволюция структуры порошка в процессе смешения представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что в результате обработки шихты в ПЦМ происходит агломерация частиц бронзы (крупные светлые включения) с железными и кобальтовыми частицами (мелкие серые частицы).

Для исследованных составов были найдены оптимальное время смешения связки с наночастицами и соотношение шаров к материалу. На рис. 2 представлены результаты исследования микроструктуры методом ПЭМ горячепрессованных компактных образцов двух однофазных модельных систем. В качестве модельных выбраны порошки кобальта (марки Co extra fine) и меди (ПМС-1) с добавками наночастиц WC.

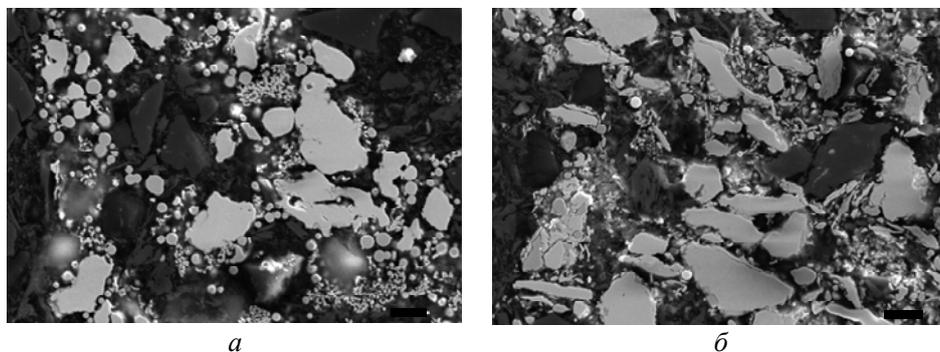
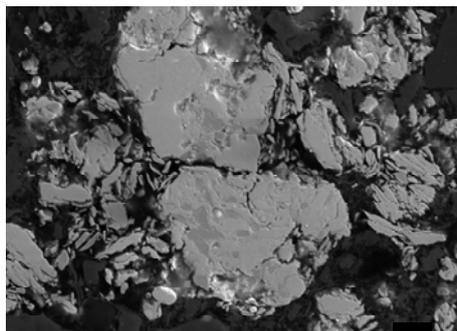
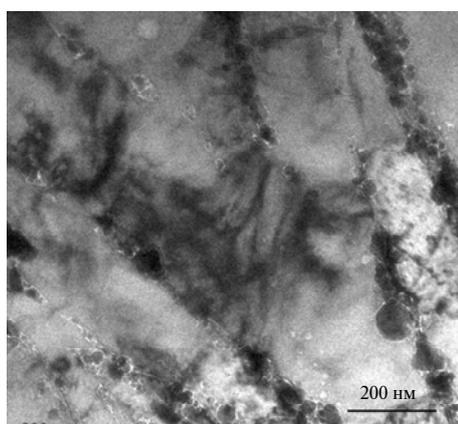


Рис. 1. Морфология порошка связки К после смешения в ПЦМ: исходный порошок (а), обработка в ПЦМ в течение 6 (б) и 10 (в) мин. ×1000.

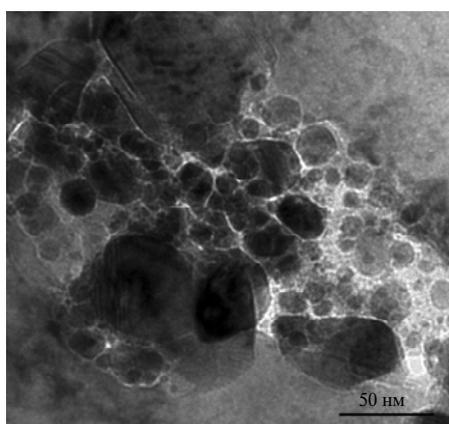


б

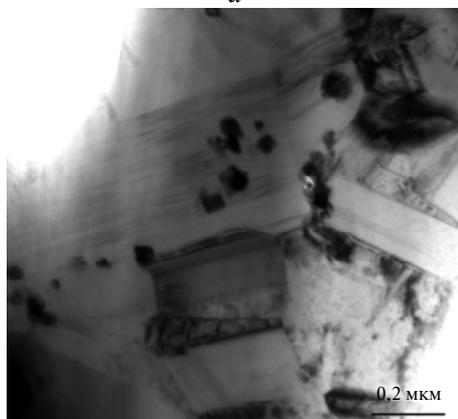
Рис. 1. (Продолжение).



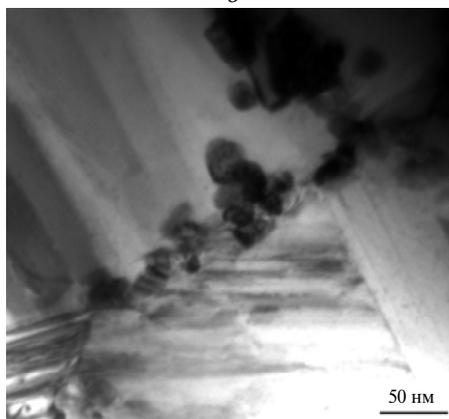
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктура горячепрессованных сплавов Cu + наноWC (а, б) и Co + наноWC (в, г).

В результате смешения, как видно из рис. 2, наночастицы достаточно равномерно распределены по границам зерен сплава Cu + WC (рис. 2, а, б). Для сплава с кобальтовой матрицей упрочняющая фаза обнаружена не только на межзеренной границе, но и внутри зерна (см. рис. 2, в). По мнению авторов, наночастицы остаются в теле зерна в результате движения межзеренных границ на стадии твердофазного спекания при горячем прессовании, когда подвижность границ из-за внешнего давления значительно усиливается.

В табл. 3 и 4 приведены механические свойства безалмазных сегментов с дисперсно-упрочненной связкой.

Таблица 3. Свойства дисперсно-упрочненных образцов со связкой М, температура горячего прессования $T_c = 850$ °С

Состав, % (по массе)	Время обработки в ПЦМ, мин	Пористость, %	Твердость, <i>HRB</i> 1,5/980	Прочность при изгибе σ_b , МПа
$M_{исх}$	0	4	105	1260±60
М “0”	3	5	107	1060±50
М + 2WC	3	6	105	1050±160
М + 4WC	3	5	108	1050±70
М + 6WC	3	6	107	900±30
М + 0,5ZrO ₂	3	5	109	1260±30
М + 1,25ZrO ₂	3	6	108	1010±160
М + 2,5ZrO ₂	3	6	110	980±20

Примечание. Образец с маркировкой “0” представляет собой исходную шихту, обработанную в ПЦМ при заданном времени.

Таблица 4. Свойства дисперсно-упрочненных образцов со связкой К, температура горячего прессования $T_c = 800$ °С

Состав, % (по массе)	Время обработки в ПЦМ, мин	Пористость П, %	Твердость <i>HRB</i> 1,5/980	Прочность при изгибе σ_b , МПа
$K_{исх}$	0	1	94	720±20
К “0”	3	2	96	800±20
К “0”	6	2	97	830±30
К “0”	10	2	97	860±60
К + 4WC	3	2	97	570±20
К + 4WC	6	2	99	630±50
К + 4WC	10	2	100	690±50
К + 0,5ZrO ₂	3	2	96	650±30
К + 1,25ZrO ₂	3	2	98	670±50
К + 1,25ZrO ₂	6	2	100	770±30
К + 2,5ZrO ₂	3	2	99	630±50
К + 2,5ZrO ₂	6	2	100	740±50

Введение в связку М наночастиц приводит к росту пористости образцов после горячего прессования на 1—2 % с одновременным повышением твердости на 2—5 ед. *HRB* по сравнению с исходной связкой.

В результате обработки связки К в ПЦМ наблюдали увеличение пористости горячепрессованных образцов на 1 %, что для чистой связки К (см. образцы с маркировкой “0” в табл. 4) может быть объяснено образованием препятствующих спеканию оксидных слоев. С ростом длительности обработки в ПЦМ, несмотря на возросшую пористость, для всех образцов наблюдается увеличение твердости и прочности на изгиб, что обусловлено измельчением зеренной структуры связки и более равномерным перераспределением нано-

частиц. Микроструктурные исследования горячепрессованных образцов подтверждают уменьшение среднего размера зерна сплава при увеличении времени обработки в ПЦМ (рис. 3). По сравнению с исходной связкой образцы с наночастицами, благодаря эффекту дисперсного упрочнения, имеют повышенную на 3—6 ед. *HRB* твердость.

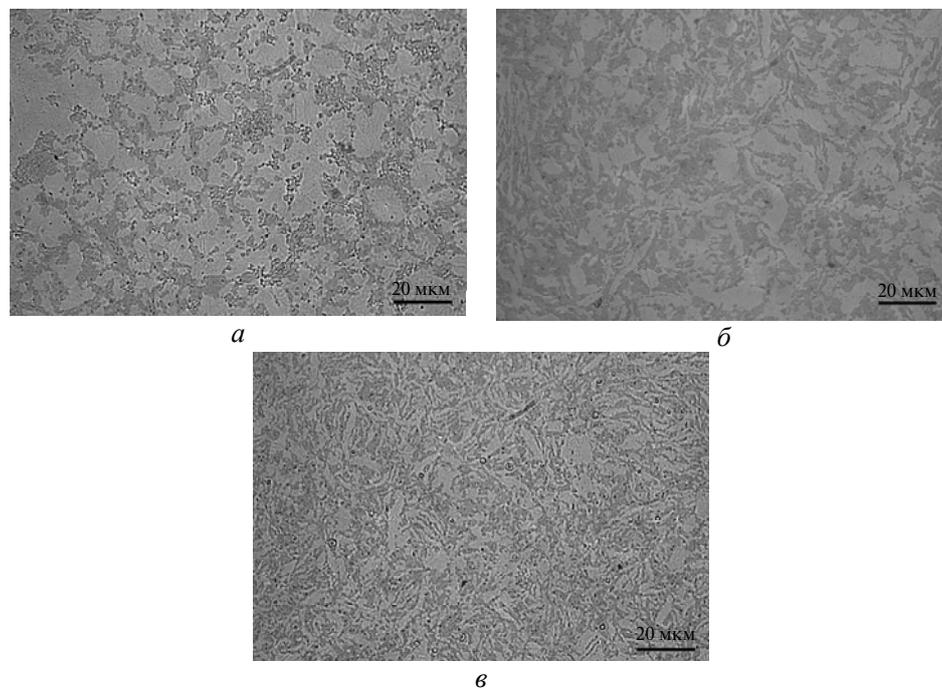


Рис. 3. Микроструктура горячепрессованных образцов связки К при различных временах смешения в ПЦМ: исходная (а), обработка в ПЦМ в течение 6 (б) и 10 (в) мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА С ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ СВЯЗКОЙ

Результаты сравнительных испытаний алмазного отрезного сегментного круга \varnothing 500 мм при резке армированного бетона марки М400 (наполнитель гранитный) со средним процентом армирования \sim 5 % приведены на рис. 4.

Вопреки ожиданиям упрочнение связки К наноразмерным WC не дало заметного положительного эффекта (увеличение ресурса на 10 % лежит в доверительном интервале измерений эксперимента). В то же время упрочнение связки оксидом циркония привело к ощутимому росту ресурса круга на 60 %. При этом не происходит снижения скорости резания. Все исследованные алмазные круги работали в режиме самозатачивания.

В табл. 5 приведены некоторые данные по сверлению высокоармированного железобетона сверлами \varnothing 100 мм с алмазными сегментами со связкой М.

При постановке эксперимента по сверлению серийно выпускаемых промышленностью железобетонных плит из-за неравномерности распределения арматуры трудно выбрать для сверления два участка с одинаковым армированием. Поэтому приведенные в табл. 5 данные представляют собой выборочные испытания с максимально близким процентом армирования железобетона.

бетона. Практика испытаний показывает, что ресурс сверла от степени армирования железобетона зависит нелинейно (рис. 5).

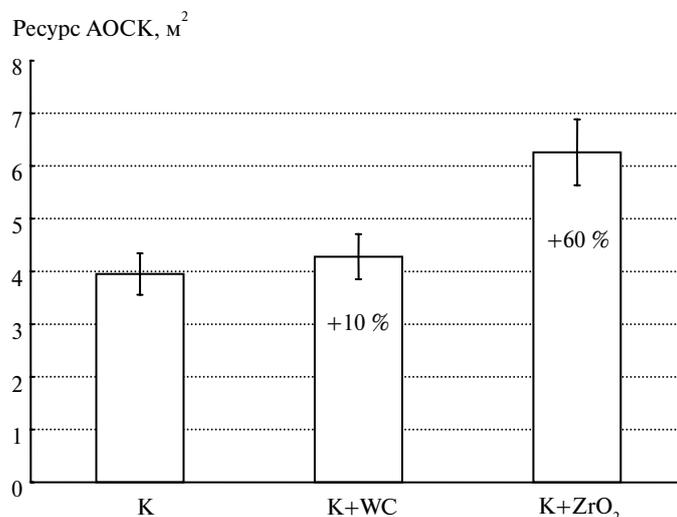


Рис. 4. Результаты испытаний АОСК Ø 500 мм при резке армированного бетона марки М400.

Таблица 5. Результаты сравнительных испытаний сверл Ø 100 мм по сверлению высокоармированного железобетона марки М400

Тип сегмента	Процент армирования железобетона, % (по объему)	Скорость сверления, см/мин	Удельный ресурс сверла, мм/м
М + алмаз	9,5	0,87	8,83
	9,9	0,99	7,58
	11,1	0,77	13,17
(М + WC) + алмаз	10,6	0,83	5,67
	9,9	1,09	5,92
	9,5	1,01	7,92
(М + ZrO ₂) + алмаз	10,4	5,42	5,42
	10,2	8,50	8,50
	11,4	8,42	8,42

Из рис. 5 видно, что 4—5 % армирования — это критическое содержание арматуры, при котором происходит интенсивный износ алмазных зерен, в том числе их заполировывание, что приводит к резкому увеличению износа сегментов и снижению скорости резания. Из многочисленных экспериментальных данных [22—23] известно, что алмазный инструмент для резки Fe, Ni изнашивается значительно быстрее, чем для Al, Cu, что не может быть объяснено только различием в механических свойствах этих металлов. Главной причиной снижения ресурса алмазного инструмента является то, что Fe и Ni каталитически ускоряют процесс графитизации алмаза. Вероятный механизм такого превращения приведен в [24].

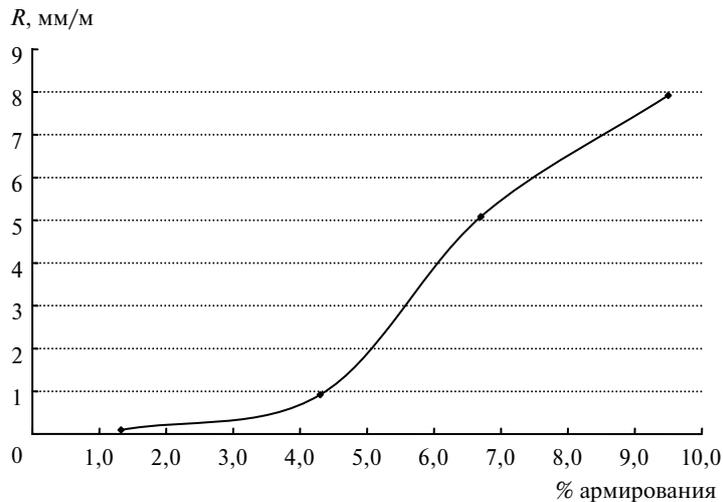


Рис. 5. Зависимость удельного ресурса сверла R от степени армирования железобетона.

Как видно из экспериментальных данных, приведенных в табл. 5, сегмент со связкой М + WC имеет увеличенный до 40 % ресурс. Следует обратить внимание на то, что, несмотря на возросшую твердость связки, скорость сверления осталась неизменной. Скорость сверления v армированного бетона зависит от многих переменных нелинейно и в общем случае при использовании алмазов с заданными крупностью, статической и динамической прочностью, термостойкостью является сложной функцией многих переменных (4):

$$V = f(F, n, C_{\text{алм}}, W_{\text{б}}, W_{\text{арм}}, A, W_{\text{св}}, \sigma_{\text{алм}}), \quad (4)$$

где F — нормальная нагрузка на сверло; n — частота вращения сверла; $C_{\text{алм}}$ — концентрация алмазов в сегменте (каратность); $W_{\text{б}}$ — износостойкость бетона; $W_{\text{арм}}$ — износостойкость арматуры; A — процентное содержание арматуры; $W_{\text{св}}$ — износостойкость связки; $\sigma_{\text{алм}}$ — прочность алмазоудержания.

Поскольку для всех исследованных сегментов условия испытания и концентрация алмазов были одинаковы, то в (4) в результате введения наночастиц в связку могли измениться только два параметра — износостойкость связки $W_{\text{св}}$ и прочность алмазоудержания $\sigma_{\text{алм}}$.

Результаты трибологических испытаний связки К приведены в табл. 6. Для этих испытаний образцы были получены при температуре горячего прессования 800 °С.

Из табл. 6 видно, что в результате введения наночастиц происходит увеличение износостойкости более чем в три раза. По литературным данным износостойкость хорошо коррелирует с твердостью материала [25], в то время как достоверной зависимости твердости и прочности алмазоудержания не обнаружено.

Из [26] известно, что высота выступа алмазного зерна из связки p ($0 < p < 0,5D$, где D — диаметр алмазного зерна) определяется соотношением скорости износа связки и алмазов. С ростом твердости, а значит и износостойкости связки, высота выступа алмазного зерна p должна уменьшаться, что в свою очередь, должно привести к снижению скорости сверления. Тем не менее, по результатам эксперимента не наблюдали снижения скорости сверления (см. табл. 5). Поэтому вероятным объяснением установленного эффекта является

рост прочности алмазоудержания за счет введения наночастиц. Механизм увеличения прочности алмазоудержания в дисперсно-упрочненных наночастицами связках в настоящее время до конца не изучен и исследования продолжаются.

Таблица 6. Износостойкость связки К

Состав, % (по массе)	Время обработки в ПЦМ, мин	$W_{св} \times 10^4, \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$
$K_{исх}$	0	8,1
К + 4WC	6	6,6
К + 1,25ZrO ₂	3	5,9
К + 1,25ZrO ₂	6	2,2
К + 2,5ZrO ₂	3	7,6
К + 2,5ZrO ₂	6	5,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ введения упрочняющих наночастиц в связки для алмазного инструмента, обеспечивающий равномерное распределение упрочняющей фазы как по границам зерен связки, так и в теле зерна.

Изучены механические и трибологические свойства дисперсно-упрочненных связок. Показано, что в результате введения наночастиц происходит рост твердости на 3—6 ед. *HRB*, предела прочности на изгиб — до 50 МПа и износостойкости — более чем в 3 раза.

Проведены сравнительные стендовые испытания АОСК и АКС для резки высокоармированного железобетона. Для АКС Ø 100 мм построена зависимость удельного ресурса сегмента от процента армирования железобетона и обнаружено, что при 4—5 % (по объему) армирования наблюдается резкое увеличение износа алмазного сегмента. Показано, что использование дисперсно-упрочненных связок приводит к росту ресурса инструмента до 60 % без снижения скорости резания.

На основании экспериментальных данных зависимости ресурса и производительности алмазного инструмента с дисперсно-упрочненной наночастицами связкой авторами выдвинута гипотеза о влиянии наночастиц на прочность алмазоудержания.

Работа выполнена при поддержке ГК № 02.513.11.3470 “Разработка нового поколения наноструктурированных композиционных материалов для резания особопрочного и высокоармированного бетона с участием научных организаций Китая”.

Описано дві дисперсно-зміцнені наночасточками WC і ZrO₂ зв'язки, які застосовують при виробництві алмазного інструменту для різання залізобетону. Досліджено характер розподілення наночасточок по металічній матриці, визначені фізико-механічні та трибологічні властивості зв'язок. Показано, що використання дисперсно-зміцнених зв'язок веде до росту ресурсу інструменту до 60 % без зниження швидкості різання.

Ключові слова: зв'язки для алмазного інструменту, дисперсно-зміцнені матеріали, алмазний відрізний сегментий круг, різання залізобетону.

The paper describes two bonds dispersion-reinforced with WC and ZrO₂ nanoparticles, which are used in the manufacture of diamond tools for cutting reinforced concrete. The pattern of distribution of nanoparticles in the metal matrix is studied. Physical-

mechanical and tribological properties of the bonds have been determined. The use of dispersion-reinforced bonds is demonstrated to ensure a 60% longer tool life without reducing the cutting speed.

Keywords: *diamond tool bonds, dispersion-reinforced materials, segmented diamond cutoff wheels, cutting of reinforced concrete.*

1. Ylikerälä J., Gasik M. Cobalt price hikes set search for alternates in train // Metal Powder Report. — 2004. — **59**, N 9. — P. 36—39.
2. Lison D. Human toxicity of cobalt-containing dust and experimental studies on the mechanism of interstitial lung disease (hard metal disease) // Crit. Rev. Toxicol. — 1996. — **26**, N 6. — P. 585—616.
3. Spriano S., Chen Q., Settineri L., Bugliosi S. Low content and free cobalt matrixes for diamond tools // Wear. — 2005. — **259**, N 7—12. — P. 1190—1196.
4. Nitkiewicz Z., Świerzy M. Tin influence on diamond-metal matrix hot pressed tools for stone cutting // J. Mater. Proc. Tech. — 2006. — **175**, N 1—3. — P. 306—315.
5. Аносов Ю. Л., Антонова Т. Н., Бондарев Е. К. Синтетические сверхтвердые материалы / Под ред. Н. В. Новикова. — Киев: Наук. думка, 1986. — Т. 2. — 264 с.
6. Варенков А. Н., Костиков В. И., Ножкина А. В. Физикохимия взаимодействия алмазов с металлами, сплавами и соединениями. — М.: МИСиС, 1986. — 120 с.
7. Пат. 2286241 С1 РФ, МПК В 24 D 3/06. Связка для изготовления алмазного инструмента / Е. А. Левашов, В. А. Андреев, В. В. Курбаткина. — Заявл. 14.11.2005; Оpubл. 27.10.2006.
8. Пат. 2286242 С1 РФ, МПК В 24 D 3/06. Связка для изготовления алмазного инструмента / Е. А. Левашов, В. А. Андреев, В. В. Курбаткина. — Заявл. 14.11.2005; Оpubл. 27.10.2006.
9. Пат. 2286243 С1 РФ, МПК В 24 D 3/06. Связка для изготовления алмазного инструмента / Е. А. Левашов, В. А. Андреев, В. В. Курбаткина. — Заявл. 14.11.2005; Оpubл. 27.10.2006.
10. Pat. 2007/055616 WO, B 24 D 3/06. Binder for the Fabrication of diamond tools / E. A. Levashov, V. A. Andreev, V. V. Kurbatkina. — Publ. 18.05.2007.
11. Pat. 2009107291 A1 US, B 22 F 1/00. Binder for the fabrication of diamond tools / E. A. Levashov, V. A. Andreev, V. V. Kurbatkina. — Publ. 30.04.2009.
12. Портной К. И., Бабич Б. Н. Дисперсно-упрочненные материалы. — М.: Металлургия, 1974. — 192 с.
13. Zhang Z., Chen D. L. Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength // Scripta Materialia. — 2006. — **54**, N 7. — P. 1321—1326.
14. Ramakrishnan N. An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites // Acta Mater. — 1996. — **44**. — P. 69—77.
15. Zhang Q., Chen D. L. A model for predicting the particle size dependence of the low cycle fatigue life in discontinuously reinforced MMCs // Scripta Materialia. — 2004. — **51**, N 9. — P. 863—867.
16. Nardone V. C., Prewo K. M. On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites // Scripta Metall. — 1986. — **20**, N 1. — P. 43—48.
17. Hansen N. The effect of grain size and strain on the tensile flow stress of aluminium at room temperature // Acta Metall. — 1977. — **25**. — P. 863—869.
18. Dieter G. E. Mechanical metallurgy. — New York (NY): Mc-Graw-Hill, 1986. — P. 212—220.
19. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. Особенности влияния нанодисперсных добавок на процесс спекания и свойства порошковых кобальтовых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. — 2008. — № 2. — С. 53—59.
20. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. Особенности влияния нанодисперсных добавок на процесс получения и свойства спеченного сплава Fe—Co—Cu—Sn // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2008. — № 2. — С. 35—41.
21. Levashov E., Kurbatkina V., Zaytsev A. Improved mechanical and tribological properties of metal-matrix composites dispersion-strengthened by nanoparticles // Materials. — 2010. — **3**. — P. 97—109.

22. *Paul E., Evans C., Mangamelli A. et al.* Chemical aspects of tool wear in diamond turning // *Prec Eng.* — 1996. — **18**, N 1. — P. 4—19.
23. *Kohlscheen J., Stock H.R., Mayr P.* Tailoring of diamond machinable coating materials // *Prec. Eng.* — 2002. — **26**. — P. 175—182.
24. *Uemura M.* An analysis of the catalysis of Fe, Ni or Co on the wear of diamonds // *Tribology International.* — 2004. — **37**. — P. 887—892.
25. *Коновалов В. А., Александров В. А., Левин М. Д.* Влияние прочности алмазодержания и скорости абразивного износа связки на работоспособность алмазно-абразивного камнерезного инструмента // *Синт. алмазы.* — 1975. — Вып. 2. — С. 26—28.
26. *Brook B.* Principles of diamond tool technology for sawing rock // *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sci.* — 2002. — **39**. — P. 41—58.

Национальный исследовательский технологический
ун-т “Московский ин-т стали и сплавов”
ЗАО “Кермет”

Поступила 03.06.10