

УДК 621.762:620.22-419 : 669.25

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ И МАКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА СВЯЗКИ Fe–Mo ДЛЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

© 2013 г. **В. А. Андреев, А. И. Гуреев, П. И. Севастьянов, В. И. Логинов, Е. А. Левашов, П. А. Логинов, С. И. Рупасов, В. В. Курбаткина**

ОАО «НПО ЦНИИТМАШ», г. Москва

ЗАО «Кермет», г. Москва

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Научно-учебный центр СВС МИСиС–ИСМАН, г. Москва

В. А. Андреев – канд. физ.-мат. наук, зам. директора ИТПН, заведующий отделом НПО «ЦНИИТМАШ» (115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковая, 4). Тел.: (495) 675-89-88. E-mail: vamdreev@kermet-m.ru.

А. И. Гуреев – инженер, начальник участка НПО «ЦНИИТМАШ». E-mail: agureev-kermet@yandex.ru.

П. И. Севастьянов – гл. технолог ЗАО «Кермет»

(115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4). Тел.: (495) 675-52-91. E-mail: psevastyanov@yandex.ru.

В. И. Логинов – гл. металлург ЗАО «Кермет». Тел.: (495) 786-68-01.

Е. А. Левашов – докт. техн. наук, проф., акад. РАЕН, зав. кафедрой порошковых материалов и функциональных покрытий (ПМиФП), директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.

П. А. Логинов – инженер НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (499) 237-53-36. E-mail: pavel.loginov.misis@list.ru.

С. И. Рупасов – ст. науч. сотр. кафедры ПМиФП. Тел.: (499) 237-53-36. E-mail: rupasov@misis.ru.

В. В. Курбаткина – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. Тел.: (499) 237-53-36. E-mail: vvkurb@mail.ru.

Изучено совместное влияние на структуру и физико-механические свойства горячепрессованного сплава Fe–Mo двух факторов: 1) модифицирования сплава легирующей добавкой нанопорошка WC посредством механического активирования смеси; 2) комбинирования гранул шихты, содержащих легирующую добавку и без нее. Установлено существование концентрационного предела упрочнения сплава при его наномодифицировании и показана возможность получения материала с высокими ударной вязкостью и модулем упругости при указанном комбинировании гранул.

Ключевые слова: алмазный инструмент, капсулирование, наночастицы, дисперсное упрочнение.

The work describes the combined effect on the structure and physical-mechanical properties of hot-pressed Fe–Mo alloy of two factors: 1) updating of the alloy by WC powder alloying addition by means of mechanical activation of the mixture; 2) combinations of mix material granules containing the alloying addition and without it. The concentration hardening limit of the alloy in nano-modifying as well as the opportunity of producing material with high impact strength and elastic modulus at the specified granule combination were found.

Key words: diamond tool, encapsulation, nanoparticles, precipitation hardening.

ВВЕДЕНИЕ

Современные добывающая и обрабатывающая отрасли промышленности широко используют сверхтвердые материалы (синтетические алмазы, кубический нитрид бора), в частности, они востребованы в строительстве, геологоразведке, производстве строительных материалов из натурального камня и др. Поэтому актуальными являются исследования в этой области, направленные на улучшение служебных характеристик инструмента без увеличения его себестоимости.

С этой точки зрения перспективным способом повышения конкурентоспособности инструмента является создание низколегированных сплавов на основе железа, где компенсация относительно

низкой стойкости связки обеспечивается ее дисперсным упрочнением путем введения малого количества нанодисперсных порошков [1–7].

Ряд исследований [8] указывают на то, что служебные характеристики алмазного инструмента можно улучшить применением технологии капсулирования алмазных монокристаллов, когда на стадии подготовки гранулированной шихты из порошков алмазов и связки последняя окружает исходный монокристалл, образуя при спекании упрочненную зону вокруг алмаза.

При разработке экономно-легированной связки на основе железа необходимо применение легирующих металлов, в качестве которых, как правило, используют Co, Ni, W [9]. Значительно менее исследованной, но эффективной легирующей

добавкой может быть молибден. Он традиционно входит в состав сталей, повышая одновременно прочностные, вязкие свойства и износостойкость без увеличения их хрупкости [10]. Эти особенности молибдена можно использовать для легирования спекаемой связки на основе железа.

Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния нанодисперсного упрочнения на свойства сплава Fe–Mo. Измерены характеристики образцов, полученных холодным прессованием из 2 типов гранул – исходных, указанного состава, и с добавкой наномодификатора (НМ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С учетом перспективности Mo как легирующей добавки в данной работе в качестве базовой связки исследовался сплав 85 % Fe + 15 % Mo. По результатам предварительных испытаний и расчетов такой состав имеет лучшее среди композиций системы Fe–Mo соотношение прочности и стоимости порошковых компонентов. В экспериментах использовались следующие порошки:

- карбонильного железа ВК 3 дисперсностью –23 мкм (ТУ 2436-045-05807977-98);
- молибдена дисперсностью –5 мкм (ТУ 48-19-316-92);
- плазмохимического карбида вольфрама WC с удельной поверхностью $S_{уд} = 6 \div 9 \text{ м}^2/\text{г}$ и средним размером частиц $d = 80 \text{ нм}$.

Как показано ранее в работах [1–7], наномодифицирование карбидом вольфрама в оптимальной концентрации металлических связок, включающих Co, Ni, Cu, Fe, приводит к увеличению их твердости и прочности, а соответственно, способствует росту ресурса и производительности алмазного инструмента.

Введение НМ осуществлялось в планетарной центробежной мельнице МПП-1 по следующему режиму: соотношение масс шаров и обрабатываемого материала составляло 15:1; скорости вращения водила и барабанов – 422 и 800 об/мин соответственно; центробежный фактор 28g; время смешивания 3 мин. Для предотвращения окисления в процессе обработки дополнительно вводился изопропиловый спирт (10 % от массы порошка). Шихты, содержащие НМ и без них, гранулирова-

лись отдельно. Один тип гранул состоял из базовой связки (далее обозначена как «Б»), а второй – представлял собой связку Б с введенным НМ (т. е. «Б–хНМ», где x – концентрация НМ, мас.%).

Для грануляции в шихту добавлялось временное органическое связующее в концентрации, обеспечивающей достаточную прочность гранул при их последующем низкоэнергетическом смешивании. Ввод связующего проводился в миксере марки Major KM-020 («Kenwood»), а последующее гранулирование – на грануляторе GM-260. Все гранулы затем калибровались на ситах для получения фракции –600 мкм.

Смешивание гранул обоих типов осуществлялось в смесителе Turbula-Typ T2F с минимальной частотой вращения и в отсутствие мелющих тел. Такой щадящий режим выбран для сохранения целостности гранул и перемешивания состава. После смешивания гранул и их брикетирования спекался макрокомпозит.

Пропорции гранул Б и Б–хНМ в смесях выбраны из следующих допущений. В режущих элементах алмазного инструмента, как правило, относительная концентрация алмазов составляет около 25 % и они занимают 6,25 % объема всего сегмента. Допуская, что вокруг алмаза образуется сфера (капсула) из связки с диаметром в 2 раза больше, чем у алмаза, получаем, что капсулы будут занимать объем 2^3 , т. е. в 8 раз больше, чем объем собственно алмазов, что соответствует 50 % объема всей связки. Принимая во внимание, что плотность алмазов составляет $3,55 \text{ г/см}^3$, а насыпная плотность связки – $3,2 \div 4,2 \text{ г/см}^3$, получаем, что гранулы, состоящие только из порошков связки, имеют примерно ту же среднюю плотность, что и капсулы, содержащие алмаз.

Следовательно, связка, состоящая из гранул типов Б и Б–хНМ в массовом соотношении 50:50, по интегральным физико-механическим свойствам подобна связке, в которой алмазы заключены в капсулу состава Б–хНМ. Именно эта пропорция гранул взята для исследований и обозначена как $1/2 \text{ Б} + 1/2 (\text{Б–хНМ})$, где коэффициент $1/2$ указывает, что гранулы соответствующего типа составляют $1/2$ всей массы исследованной связки.

Брикетирование выполнялось на прессе КР-35 при давлении 200 МПа, горячее прессование – на прессе DSP-475 в атмосфере аргона при давлении прессования 35 МПа при максимальной

температуре в цикле спекания $t_{\text{спек}} = 925 \div 1000$ °C. При более высокой ее величине алмаз начинает активно графитизироваться. Измерение плотности проводилось методом гидростатического взвешивания на аналитических весах Adventurer. Твердость *HRB* определялась на приборе Wolpert 600 MRD по шкале *B* (ГОСТ 20017-74). Предел текучести, модуль упругости и предел прочности оценивались по схеме трехточечного изгиба на универсальной испытательной машине LF-100 kN фирмы «Walter + BaiAG» по ГОСТ 18228-94. Испытания компактных образцов с U-образным надрезом на ударную вязкость осуществлялись по ГОСТ 26528-98 на компьютеризированном маятниковом копре INSTRON SI-1M.

Микроструктура связок изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа марки S-3400N, «Hitachi». Съемка велась во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 30 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показано влияние температуры на плотность и твердость горячепрессованной связки из гранул одинакового состава с различной степенью наномодифицирования. Из его данных видно, что в указанном диапазоне $t_{\text{спек}}$ изменение плотности базовой связки (кр. 1) незначительно (менее 0,9 %), а образцы, содержащие НМ, значительно сильнее уплотняются с ростом температуры. При концентрации 7,5 % WC изменение плотности с увеличением $t_{\text{спек}}$ достигает 3,3 %. Практически линейно на 7–9 % в исследованном диапазоне температур растет и твердость (см. рис. 1, б). Присутствие НМ затрудняет процесс формования за счет повышения межчастичного трения [1], но с ростом $t_{\text{спек}}$ остаточная пористость уменьшается в результате вязкого течения металлической матрицы, приводя к увеличению плотности и твердости связки. С учетом того факта, что пределы текучести, прочности и модуль упругости также возрастают с температурой, исследования, связанные с комбинированием типов гранул, проводились при $t_{\text{спек}} = 1000$ °C.

При изучении микроструктуры образцов с комбинированным составом гранул, т. е. макрокомпозиата, отмечено, что спеченные связки «на-

следуют» структуру, заданную составом гранул. На рис. 2, а, где показана микроструктура образца, полученная при увеличении $100\times$ при съемке в отраженных электронах, видны светлые и более темные области, соответствующие разной концентрации WC, а на рис. 2, б с увеличением $1000\times$ показаны их границы. Распределение фаз различимо по цвету, где самые темные области соответствуют матричной фазе Fe, светло-серые (крупные включения) – фазе Mo и белые (мелкие включения и агломераты) – фазе WC.

Из анализа представленных микроструктур следует, что:

- в спеченном материале присутствуют участки, обогащенные НМ, и зоны, в которых их концентрация почти нулевая;
- характерный размер указанных областей лежит в диапазоне 300–600 мкм, что коррелирует с размером исходных гранул (600 мкм). Хорошо заметно, что области чередуются и вытянуты вдоль двух осей с размерами около 600 и 300 мкм соответственно. Этот факт можно объяснить усадкой примерно в 2 раза размеров исходных гранул в процессе одноосного горячего прессования образцов.

Согласно теоретическим представлениям, предложенным в работе [9], главным фактором,

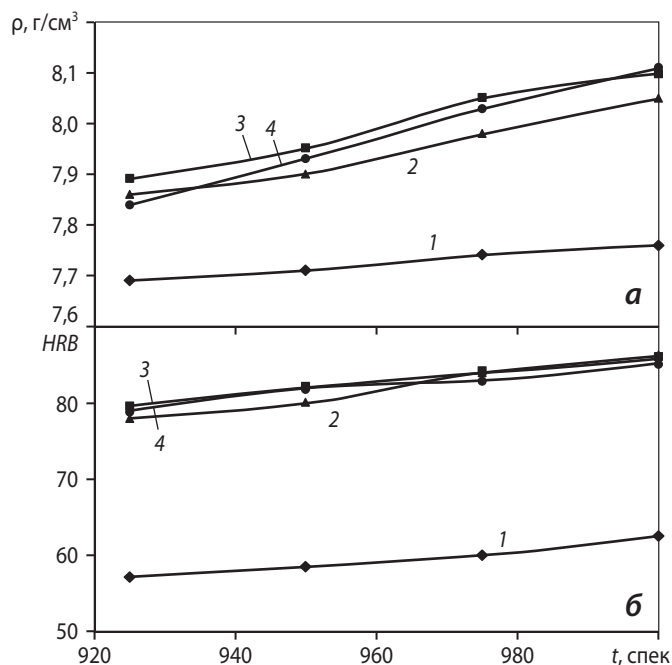


Рис. 1. Зависимость плотности (а) и твердости (б) связок с разной концентрацией НМ от температуры спекания 1 – B; 2 – B-2,5WC; 3 – B-5WC; 4 – B-7,5WC

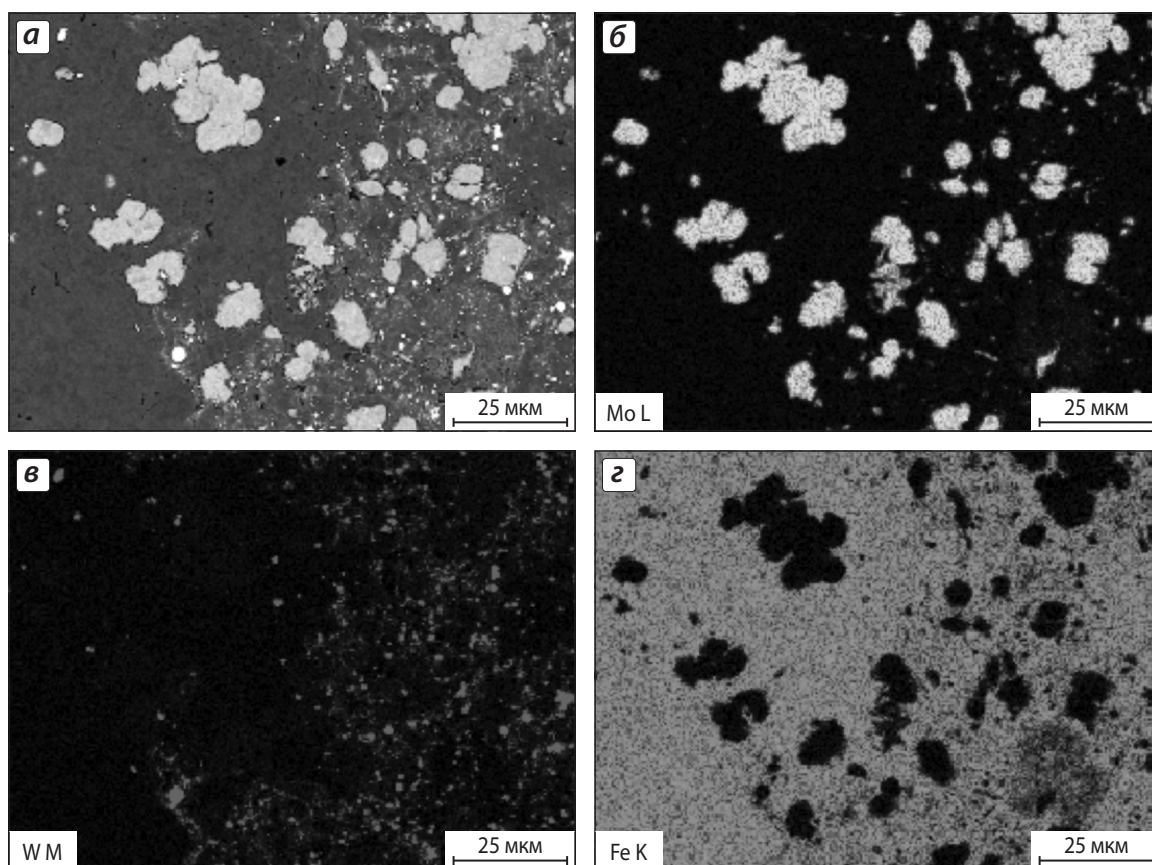


Рис. 2. Микроструктура макрокомпозита состава $1/2\text{B} + 1/2(\text{B}-\text{хНМ})$, снятая в отраженных электронах (**а**) и характеристических излучениях Mo (**б**), W (**в**) и Fe (**г**)

определяющим удержание алмаза в связке, является его механическое защемление. Превышение предела текучести связки ($\sigma_{0,2}$) при эксплуатации инструмента приводит к раскрытию механического защемления алмаза и его выпадению. При этом работа связки на удержание алмаза в области обратимых упругих деформаций тем эффективней, чем выше ее модуль упругости (E). Учитывая, что в условиях реальной эксплуатации связка помимо абразивного подвержена также ударному воздействию, для эффективной работы алмазного инструмента она должна иметь достаточно высокую ударную вязкость (W).

Физико-механические показатели спеченных связок с комбинированным и однородным составами гранул приведены на рис. 3 в сравнении с широко используемой предсплавленной связкой MX1480 ($\text{Fe}_{35}\text{Cu}_{30}\text{WC}_{20}\text{Co}_{15}$). Из его данных видно, что предел текучести и модуль упругости изученных образцов возрастают с ростом концентрации НМ. Однако выше 5 % WC наблюдается снижение прочностных свойств. Это обу-

словлено тем, что твердые наночастицы карбида вольфрама, расположенные на границах раздела фаз на основе Fe и Mo, тормозят процесс консолидации при горячем прессовании. Связка, в которой НМ введен равномерно по объему с концентрацией 5 %, имеет максимальные значения $\sigma_{0,2}$ и E , уступая при этом связке сравнения MX1480 по первому параметру, но превосходя по второму. Образцы, где только половина гранул содержит 5 % WC, отличаются по пределу текучести менее чем на 4 %, а по модулю упругости – примерно на 10 % от максимального значения.

Ударная вязкость падает с ростом концентрации НМ. Однако связки типа макрокомпозита из комбинированных гранул имеют существенно более высокую ее величину по сравнению как с однородным вариантом с той же концентрацией WC, так со связкой марки MX1480. Можно предположить, что области размером 300–600 мкм, сформированные из базовой связки с высокой ударной вязкостью, выполняют роль демпфера, а области

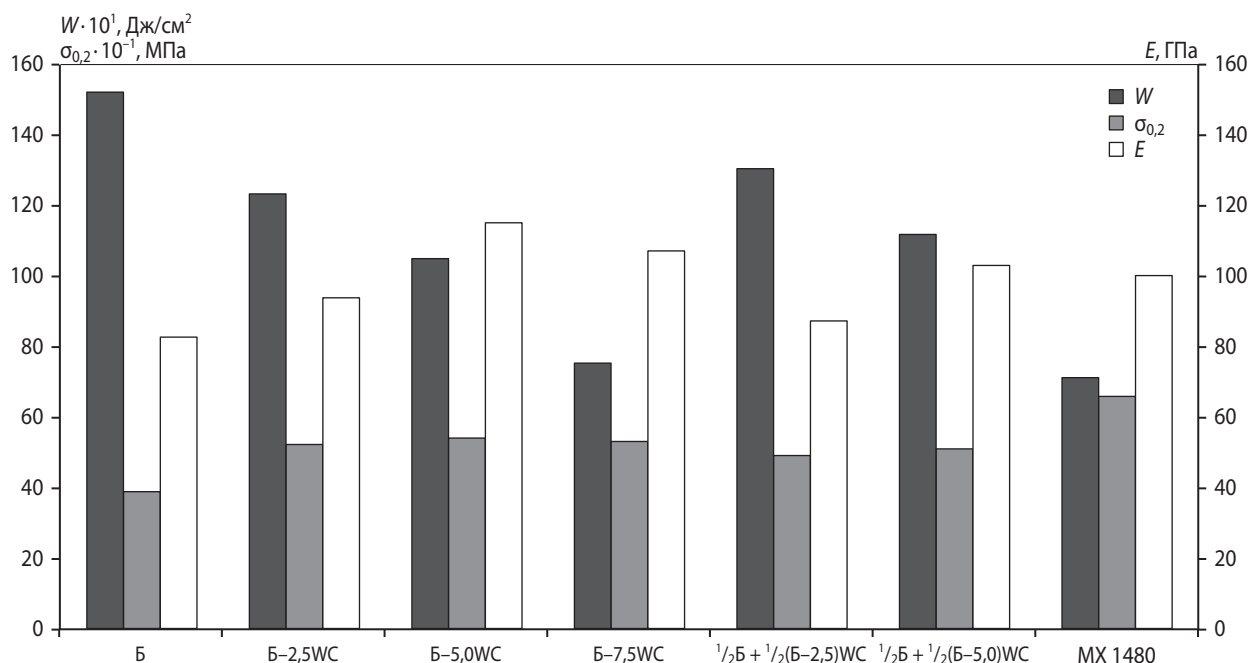


Рис. 3. Влияние состава связки на ее ударную вязкость, предел текучести и модуль Юнга

того же масштаба, сформированные из гранул с НМ, достаточно эффективно обеспечивают дисперсионное упрочнение.

ВЫВОДЫ

1. Исследована связка для изготовления режущих элементов алмазного инструмента на основе Fe–Mo с добавкой в качестве наномодификатора порошка WC. Показано, что плотность, твердость и прочностные характеристики связки растут с повышением температуры в диапазоне 925–1000 °С, при этом увеличение концентрации WC свыше 5 % приводит к разупрочнению связки.

2. Изучена возможность изготовления связки из двух типов гранул, упрочненных наночастицами и без них. Связка, спеченная из комбинации гранул с размером менее 600 мкм, имеет в своей структуре упорядоченные области с различной концентрацией НМ, коррелирующие по масштабу с величиной исходных гранул.

3. Указанная микроструктура обеспечивает связке перспективное сочетание предела текучести, модуля Юнга и ударной вязкости, что позволяет использовать существенно меньшие количества относительно дорогостоящего наномодификатора для получения эффективных связок для алмазного инструмента.

Работа выполнена в рамках госконтракта
№ 14.513.11.0046 от 20.03.2013 ФЦП
«Исследования и разработки
по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России
на 2007–2013 гг.».

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2008. № 2. С. 53.
2. Зайцев А. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2008. № 2. С. 35.
3. Levashov E. A., Kurbatkina V. V., Zaitsev A. A. // Materials. 2010. № 3. P. 97.
4. Zaitsev A. A., Sidorenko D. A., Levashov E. A. et al. // J. Superhard Mater. 2010. Vol. 6. P. 423.
5. Сидоренко Д. А., Зайцев А. А., Курбаткина В. В. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. № 1. С. 38.
6. Зайцев А. А., Сидоренко Д. А., Левашов Е. А. и др. // Сверхтвердые материалы. 2012. № 4. С. 75.
7. Токова Л. В., Зайцев А. А., Курбаткина В. В. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2012. № 3. С. 37.
8. Egan D., Lee, C., Melody, S. // EPMA World Congr. and exhibition «PM 2010». Hard Materials & Synthetic diamond Tools. Florence, Italy: Eur. Powder Metal. Ass., 2010. P. 72.
9. Konstanty J. Powder Metallurgy Diamond Tools. Elsevier. 2005.
10. Химическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1992. Т. 3. С. 125.