

УДК 621.791.01:669

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАВЛЕННЫХ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА

А.И. БЕЛЫЙ<sup>1</sup>, А.П. ЖУДРА<sup>1</sup>, А.И. РОСЛЯКОВ<sup>1</sup>, В.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, П.И. ЛОБОДА<sup>2</sup><sup>1</sup> ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua<sup>2</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: mail@KPI.ua

Проведены исследования легирования плавленных карбидов вольфрама NbC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, V<sub>4</sub>C, VC, TiB<sub>2</sub>, Mo и их влияние на физико-механические свойства сплава. Показано, что свойства сплава в значительной мере зависят от размера и количества армирующей фазы, которая во время кристаллизации может изменяться в широких пределах в зависимости от химического состава расплава и тепловых условий кристаллизации. Установлено, что высокие показатели физико-механических свойств плавленных карбидов достигаются при структурах сплава, которые представляют собой матрицу из одного тугоплавкого соединения, которое армировано волокном второго тугоплавкого соединения. Установлено повышение микротвердости сферических частиц сплава на 30...40 %, а также прочности и износостойкости, особенно при легировании Mo. Библиогр. 6, рис. 7.

*Ключевые слова:* плавленный карбид вольфрама, легирование, сферические частицы, микротвердость, микроструктура, прочность, износостойкость

Современный уровень работы машин и механизмов постоянно требует повышения их работоспособности, поэтому существует постоянная потребность создания новых, более эффективных материалов. Учитывая необходимость увеличения добычи газа в стране, можно прогнозировать значительный рост объема буровых работ, что, в свою очередь, потребует большого количества высокоэффективного бурового инструмента и оборудования, упрочненного новыми высокоэффективными наплавочными материалами.

Наиболее распространенным материалом для упрочнения, в первую очередь бурового инструмента, а также целого ряда быстроизнашивающихся деталей в машиностроении, горно-шахтном оборудовании, являются материалы для наплавки композиционных сплавов на основе литого карбида вольфрама (релита). Релит представляет собой эвтектический сплав моно- и полукарбида вольфрама WC–W<sub>2</sub>C (20...22 % WC + + 78...80 % W<sub>2</sub>C) [1, 2]. Температура плавления релита 2735 °C, содержание углерода 3,6...4,1 %, микротвердость HV100 — 2200...2400.

Микроструктура сплава представляет матрицу из полукарбида вольфрама W<sub>2</sub>C, пронизанную вытянутыми зернами карбида вольфрама WC, и, в значительной мере, подобна по микроструктуре к квазибинарным композиционным материалам с керамической матрицей и монокристаллическими керамическими волокнами [3].

Необходимо отметить, что при всех положительных качествах плавленного карбида вольфрама он имеет и ряд недостатков. В первую очередь,

это высокая хрупкость, которая присуща материалам подобного класса.

Производство плавленных карбидов вольфрама на протяжении длительного времени осуществляется в опрокидывающихся печах Таммана. Полученные таким образом слитки подвергаются дроблению с последующим рассевом на соответствующие фракции, которые применялись в соответствующих технологиях наплавки и наплавочных материалах. Частицы порошка при этом поражены трещинами и сохраняют характерные дефекты литья: поры, раковины, неоднородность состава, рыхлоты и т. п., что негативно отражается на износостойкости сплавов.

Разработанный в Институте электросварки им. Е.О. Патона метод термоцентробежного распыления слитков релита позволил получить сферическую форму частиц порошка и, благодаря высокой скорости их охлаждения, в значительной степени повысить качество. Частицы приобрели более дисперсную структуру, повышенную микротвердость и прочность. Соответственно возросла и износостойкость композиционных сплавов на основе сферического релита (рис. 1). Таким образом, установлено положительное влияние повышенной скорости охлаждения расплава релита на его эксплуатационные характеристики.

Кроме того, в работах [3, 4] показано, что механические свойства в значительной мере зависят от размера и количества армирующей фазы, которая во время кристаллизации может изменяться в широких пределах в зависимости от химического состава расплава и тепловых условий кристалли-

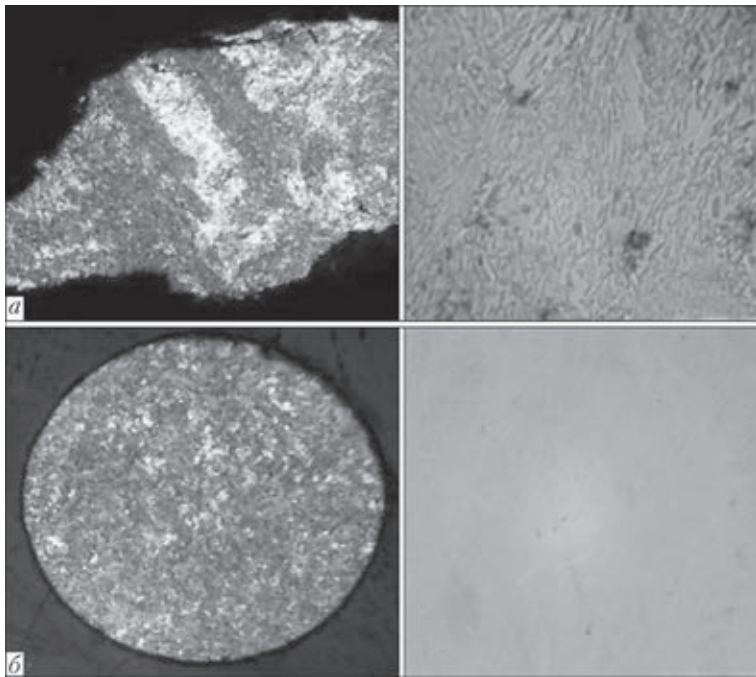


Рис. 1. Макро- и микроструктура ( $\times 100$ ) частиц дробленого (а) и сферического (б) релита

зации. В связи с этим предложено дальнейшее повышение свойств плавящихся карбидов вольфрама осуществить за счет образования твердых растворов других тугоплавких металлов, путем легирования ими релита.

Проведенные экспериментальные работы по выплавке опытных составов, легированных NbC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, V<sub>4</sub>C, VC, TiB<sub>2</sub> показали, что степень легирования указанного материала ограничена 5...7 мас. %, в зависимости от вида вводимого элемента. Превышение указанных пределов приводит к нарушению процесса плавления, интенсивному ки-

пению расплава, выбросам материала, вплоть до прекращения плавления. Учитывая данные технологические особенности, легирование сплава ограничило 5 мас. % легирующего компонента.

Полученные образцы подвергались механическому дроблению и термоцентробежному распылению с целью получения сферических частиц, заливке и изготовлению шлифов для проведения металлографического анализа и определения микротвердости — одного из основных показателей качества.

Анализ структур композиционных сплавов, полученных при различных скоростях охлаждения, показывает, что дробленные частицы имеют более дефектную структуру. Легирование Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и Mo приводит к наиболее значительному измельчению фазовых составных релита и преобладающего растворения легирующего компонента в полукарбидной фазе. По характеру микроструктуры сферические частицы, полученные в результате термоцентробежного распыления, представляют собой матрицу из полукарбида вольфрама, легированного компонентом добавки. Микроструктура перспективных легированных дробленных и сферических частиц приведена на рис. 2 и 3.

Результаты исследования микротвердости приведены на рис. 4.

Необходимо отметить высокую неоднородность по микротвердости частичек классического состава и легированных, например, 5 % TiB<sub>2</sub>,

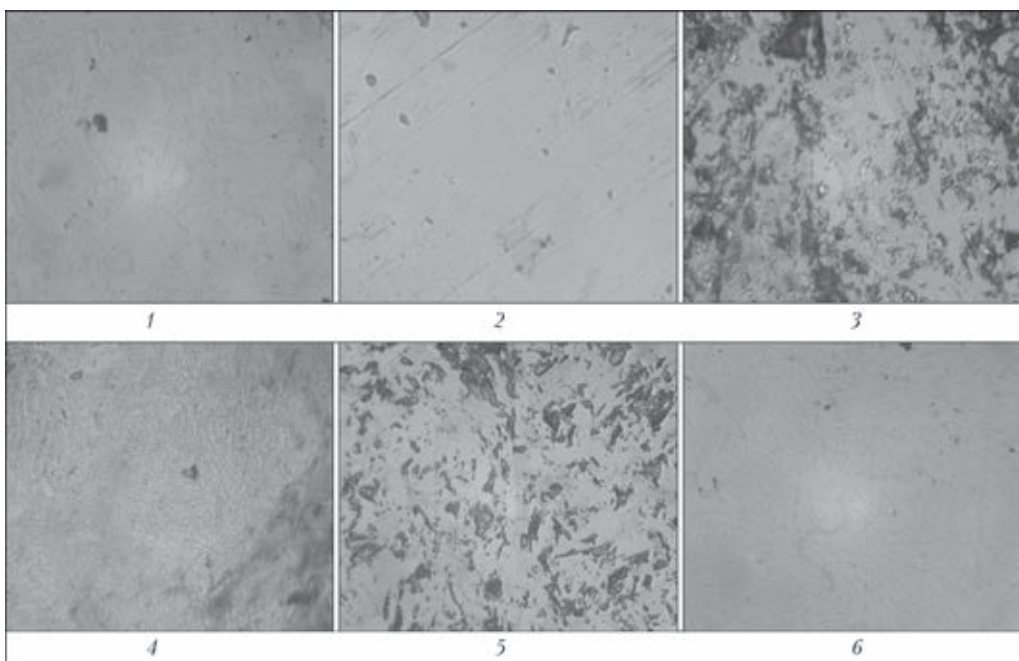


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 100$ ) легированных дробленных частиц: 1 — 5NbC+WC-W<sub>2</sub>C; 2 — 5Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>+WC-W<sub>2</sub>C; 3 — 3B<sub>4</sub>C+WC-W<sub>2</sub>C; 4 — 5VC+WC-W<sub>2</sub>C; 5 — 5TiB<sub>2</sub>+WC-W<sub>2</sub>C; 6 — 5Mo+WC-W<sub>2</sub>C

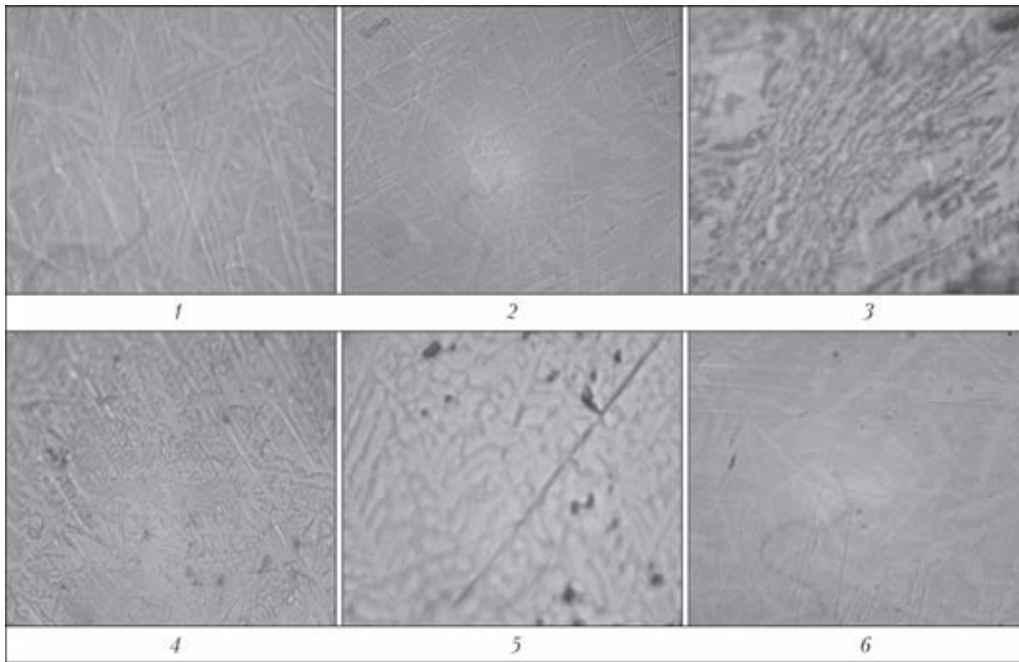


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) легированных сферических частиц: 1 —  $5\text{NbC}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 2 —  $5\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 3 —  $3\text{V}_4\text{C}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 4 —  $5\text{VC}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 5 —  $5\text{TiB}_2+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 6 —  $5\text{Mo}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$

и высокую стабильность микротвердости частиц, легированных 5 мас. % Мо (рис. 5). Это, на наш взгляд, обусловлено объемным соотношением между компонентами системы, поскольку зерна тугоплавких соединений, которые находятся в эвтектическом расплаве, разделены зерном другой природы.

Процесс термоцентробежного распыления повышает однородность структуры частиц плавленных карбидов вольфрама, что положительно отражается на их прочности. Усилие, необходимое для разрушения зерен, определяли на машине МР. Частицы помещали между двумя шлифованными пластинками и статически нагружали. Испытания проводили на сорока частицах размером 100...250 мкм каждого состава (рис. 6).

Таким образом, исследование прочности сферических частиц также показали перспективность легирования карбидов вольфрама молибденом.

При исследовании микроструктуры плавленных карбидов вольфрама классического состава в сравнении с микроструктурой сплавов,

легированных молибденом, установлено, что классический релит имеет мелкокристаллическую структуру, а релит, легированный молибденом, пластинчатую. Высокие показатели физико-механических свойств плавленных карбидов достигаются при структурах сплава, которые представляют собой матрицу с одного тугоплавкого соединения, которое армировано волокном второго тугоплавкого соединения. Анализ микроструктур карбидов вольфрама, легированных мо-

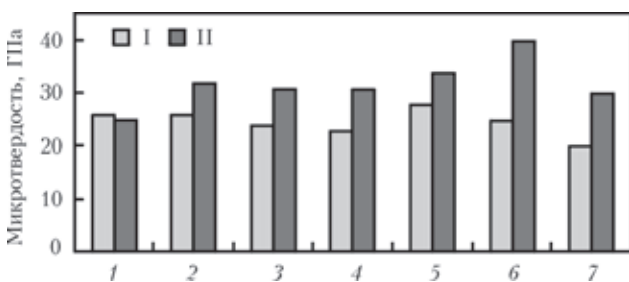


Рис. 4. Микротвердость дробленых I и сферических II частиц: 1 —  $5\text{NbC}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 2 —  $5\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 3 —  $3\text{V}_4\text{C}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 4 —  $5\text{VC}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 5 —  $5\text{TiB}_2+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 6 —  $5\text{Mo}+\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$ ; 7 —  $\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$

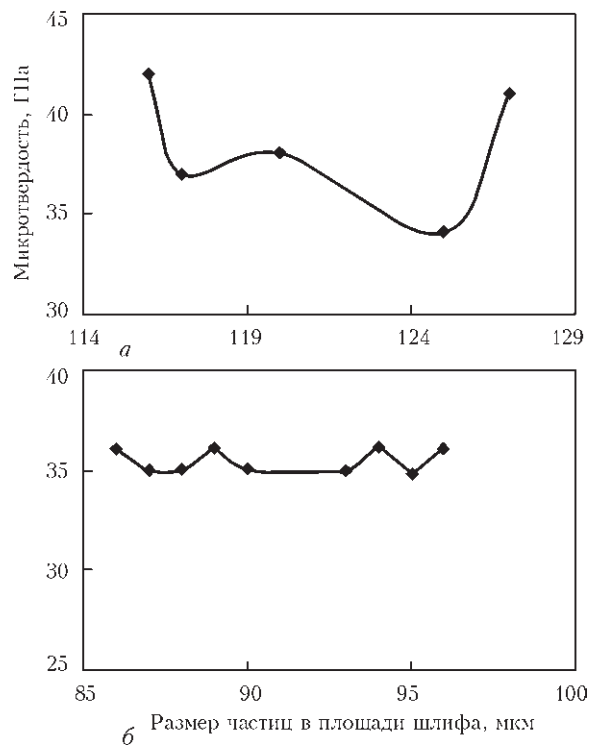


Рис. 5. Микротвердость сферических легированных частиц релита размером 100...250 мкм: а —  $5\text{TiB}_2$ ; б —  $5\text{Mo}$

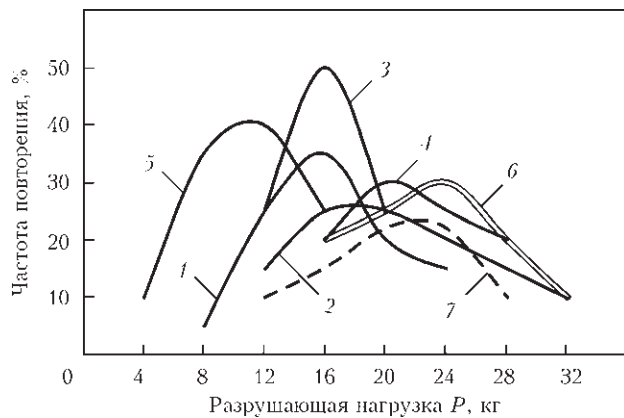


Рис 6. Прочность сферических частиц легированных сплавов карбидов вольфрама (размер частиц 100...250 мкм): 1 — 5 % NbC; 2 — 5 % TiB<sub>2</sub>; 3 — 5 % VC; 4 — 3 % B<sub>4</sub>C; 5 — 5 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 6 — 5 % Mo; 7 — WC-W<sub>2</sub>C

либденом, подтверждает образование армирующей решетки, которая состоит из сложного W-Mo карбида.

Износостойкость легированных сферических частиц исследовали путем испытаний на абразивный износ на машине НК-М [5, 6]. Абразивом служил кварцевый песок грануляции 0,05...0,5 мм. В качестве образцов использовали цилиндры диаметром 10 мм, которые изготавливались следующим образом. В графитовую форму диаметром 10 мм свободно засыпались армирующие зерна дробленых или сферических карбидов вольфрама. Сверху на зерна укладывалась порция матричного сплава из МНМц 60-20-20. Форма закрывалась графитовой крышкой и интенсивно нагревалась плазменной дугой. Матричный сплав пропитывал армирующие зерна и после остывания подлежал механической обработке по диаметру и высоте. Износ оценивался по потере массы. Площадь образцов составляла 78,5 мм<sup>2</sup>, удельная нагрузка 0,5 Па, скорость трения 0,58 м/с. Путь трения 3500 м.

Установлено, что легирование плавленных карбидов вольфрама ниобием, ванадием и молибденом повышает износостойкость сферических частиц, полученных термоцентробежным распылением. Наиболее эффективно легирование молибденом в количестве 5 % (рис. 7).

### Выводы

1. Исследования показали перспективность и целесообразность легирования плавленных карбидов вольфрама тугоплавкими металлами, что обеспечивает увеличение микротвердости на 30...40 %.

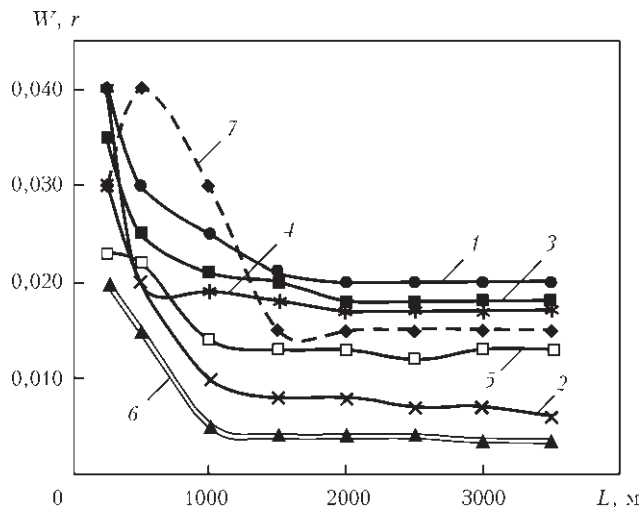


Рис. 7. Износостойкость сферических частиц легированных карбидов вольфрама размером ниже 180 мкм в сравнении с нелегированными частицами аналогичного размера (обозначения те же, что на рис. 6)

Особенно эффективно легирование при получении сферического релита центробежным распылением, которое обеспечивает повышенные скорости кристаллизации сплава.

2. Исследование прочности частиц карбида вольфрама, полученных различными способами, показало, что наибольшую прочность имеют сферические карбиды вольфрама, легированные молибденом.

3. Легирование плавленных карбидов вольфрама ниобием, вольфрамом и молибденом повышает износостойкость сферических частиц, полученных термоцентробежным распылением. Наиболее эффективно легирование молибденом в количестве 5 %.

1. Уманський Я.С. Карбiди твердих сплавiв. – М.: Металургиздат, 1947. – 132 с.
2. Самсонов Г.В., Уманський Я.С. Тверді з'єднання твердих металів. – М.: Металургиздат, 1957. – 388 с.
3. Лобода П.І. Фізико-хімічні основи створення нових боридних матеріалів для електронної техніки і розробка керамічних катодних вузлів з підвищеною ефективністю: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: КПИ, 2004.
4. Mechanism of nucleation and growth of directionally crystallized alloys of the B<sub>4</sub>C-MeB<sub>2</sub> system / I. Bogomol, O. Vasylyuk, Y. Sakka, P. Loboda. // J. of Alloys and Compounds. – 2010. – 490, № 1-2. – P. 557-561.
5. Юзвенко Ю.А. Исследование и разработка материалов и технологии механизированной наплавки открытой дугой: Дис. ... д-ра. техн. наук. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1978. – 507 с.
6. Юзвенко Ю.А., Жудра А.П., Фрумлин Е.И. Абразивный износ композиционных сплавов // Автомат. сварка. – 1973. – № 7. – С. 62-63.

Поступила в редакцию 20.04.2015