

УДК 621.891

ОЦЕНКА ИСТИННОГО РАЗМЕРА КАРБИДНЫХ ЧАСТИЦ В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ¹

© А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицин, К. В. Приходьков,
О. А. Авдеюк, А. Н. Савкин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак²

Статья поступила 29 октября 2013 г.

Описана методика косвенного измерения истинного размера карбидных зерен в твердых сплавах, полученных методом взрыва, основанная на модельных представлениях о строении карбидного скелета сплавов. Приведены результаты ее использования для изучения процесса дробления карбидных частиц в процессе прессования.

Ключевые слова: твердый сплав; удельный объем; относительная удельная поверхность; истинный диаметр частиц.

Для получения твердых сплавов и покрытий из смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами в настоящее время используются различные способы, в том числе и так называемый взрывной метод [1–3], обеспечивающий возможность консолидации порошкового материала на стадии прессования и позволяющий исключить спекание из технологического цикла получения заготовок деталей.

Как показали металлографические исследования сплавов системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$, после ударно-волновой обработки смесей порошков карбидов с металлами в структуре полученных порошковых материалов четко просматриваются образующие непрерывный скелет частицы карбидной фазы, между которыми располагаются металлическая связка и отдельные поры (рис. 1).

Механические свойства подобных материалов в значительной степени зависят от количества и дис-

персности карбидной фазы, которые обычно характеризуют удельным объемом V и величиной относительной удельной поверхности (S/V). Для измерения этих характеристик чаще всего применяют методы количественной металлографии: линейный метод и метод случайных секущих [4]. Эти методы хорошо отработаны и обеспечивают достаточную точность. Так, при использовании всего лишь 100 секущих и содержании карбидной фазы, равном 50 %, абсолютная погрешность при измерении ее удельного объема не превышает 2,56 %.

Следует отметить, что величина (S/V) не отвечает требованию преемственности оценок размеров и формы карбидных частиц на различных стадиях формирования твердых сплавов, так как в процессе консолидации порошкового сплава может происходить как дробление этих частиц, так и формирование из них прочносвязанных (за счет соединения в твердой фазе) конгломератов, которые выглядят на шлифе как одна частица сложной формы (см. рис. 1, *a*). Выявление тонкой структуры подобных конгломератов сопряже-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-12028_офи_м.

² Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия; e-mail: kroch@vstu.ru

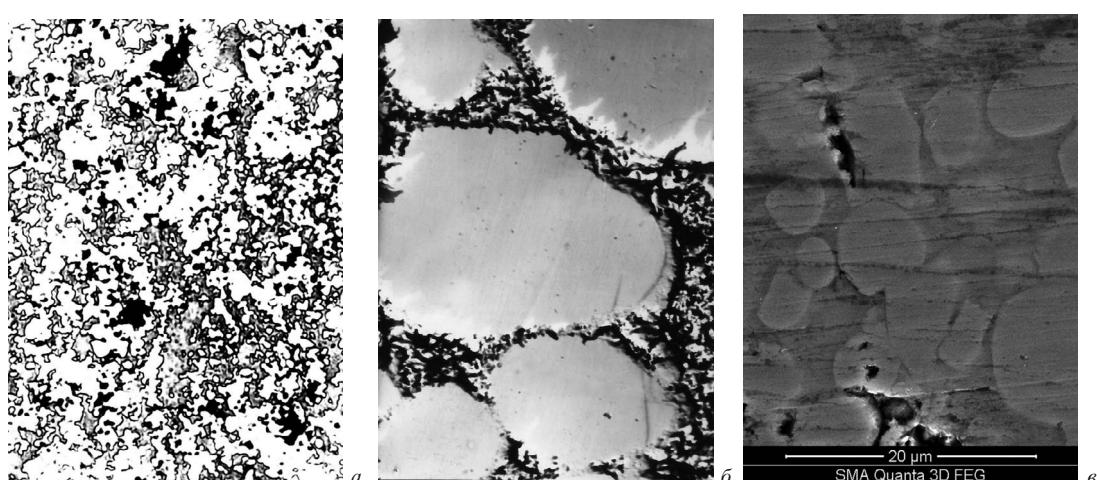


Рис. 1. Структура твердых сплавов системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$, полученных методом взрыва: *a* — оптическая микроскопия (Carl Zeiss Axiovert), $\times 200$; *б* — углеродная реплика (ПЭМ, Tesla BS 540), $\times 5000$; *в* — шлиф без травления (РЭМ, SMA Quanta 3D FEG)

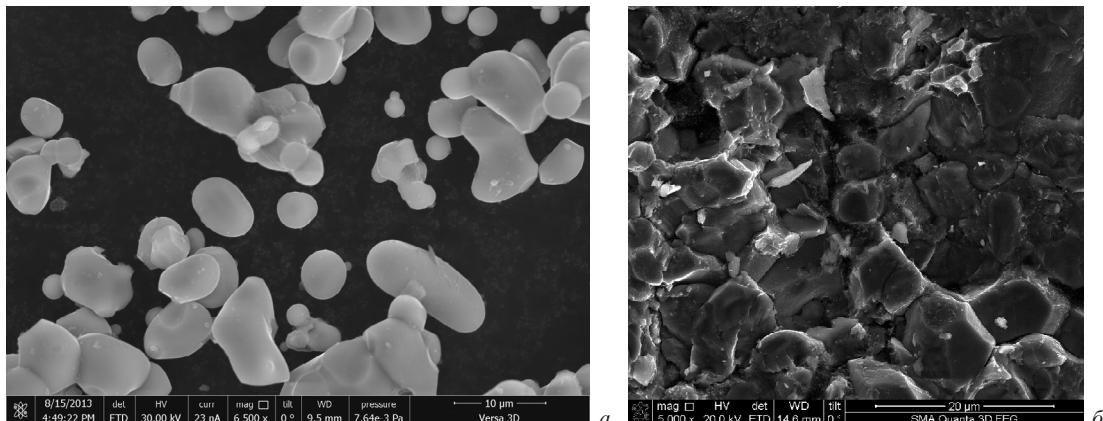


Рис. 2. Карбидные частицы в исходном состоянии (*a*) и после взрывного прессования с металлической связкой (*b*) (РЭМ): *a* — Cr₃C₂, ×6500, Versa 3D; *b* — Cr₃C₂ + Ti, ×5000, Quanta 3D FEG

но с существенными трудностями, поскольку используемые для изготовления твердых сплавов карбиды, как правило, отличаются очень низкой травимостью.

В этой связи для оценки истинного размера частиц карбидной фазы становится необходимым применение расчетных методик, основанных на модельных представлениях о строении карбидного скелета сплавов.

На основании изучения исходной формы частиц Cr₃C₂ (рис. 2, *a*) и их формы на поверхности изломов твердых сплавов, полученных взрывом (рис. 2, *b*), для построения подобной модели нами было использовано сферическое приближение формы частиц и допущено, что процессы их дробления и деформации идут независимо друг от друга: сначала происходит измельчение карбидных частиц до размера \bar{d} , а затем в результате пластической деформации осуществляется их смятие по контактным поверхностям. Допущено, что образующаяся в результате этого структура карбидного скелета имеет вид частично перекрывающихся сфер диаметром $\bar{d}_x > \bar{d}$, центры которых располагаются в пространстве случайным образом, причем так, что удельный объем и относительная удельная поверхность этой идеализированной конструкции равны удельному объему V и относительной удельной поверхности (S/V) карбидного скелета реального твердого сплава. В результате этого каждая карбидная частица будет иметь форму шара диаметром \bar{d}_x с отсеченными плоскими контактными площадками — сегментами (рис. 3). Число карбидных частиц в единице объема сплава в этом случае может быть найдено по формуле

$$N = \frac{V_x}{\pi \bar{d}_x^3 / 6}, \quad (1)$$

где V_x — удельный объем сфер диаметром \bar{d}_x без учета их взаимного перекрытия; $\frac{1}{6} \pi \bar{d}_x^3$ — объем одной такой сферы.

Поскольку известно, что для сферического приближения формы справедливо соотношение [6]

$$\bar{d}_x = \frac{6}{(S/V)_x}, \quad (2)$$

где $(S/V)_x$ — «продолженная» относительная удельная поверхность карбидной фазы [5], то формула (1) может быть преобразована к виду

$$N = \frac{V_x}{36\pi} \left(\frac{S}{V} \right)_x^3. \quad (3)$$

При случайному заполнении объема средняя вероятность попадания каждой отдельной сферы диаметром \bar{d}_x на аналогичные соседние сферы равна объемному содержанию V карбидной фазы в структуре сплава. При этом у каждой из сфер будут «теряться» половина перекрываемого соседними сферами объема (например, сегмент *acb* на рис. 3 теряется, а сегмент *adb* остается), и вся отсекаемая ими поверхность (участок сферы *acb* на рис. 3). Поэтому, суммируя по всем N частицам, можно записать

$$V = V_x - V_x V/2 \text{ и } S = S_x - S_x V, \quad (4)$$

где V, S — реальные удельный объем и удельная поверхность идеализированной модели карбидного скелета сплава. Откуда следует

$$V_x = \frac{V}{1-V/2} \text{ и } \left(\frac{S}{V} \right)_x = \frac{S}{V} \frac{1-V/2}{1-V}. \quad (5)$$

При подстановке соотношений (5) в выражение (3) получим

$$N = \frac{V}{36\pi} \left(\frac{S}{V} \right)^3 \frac{(1-V/2)^2}{(1-V)^3}. \quad (6)$$

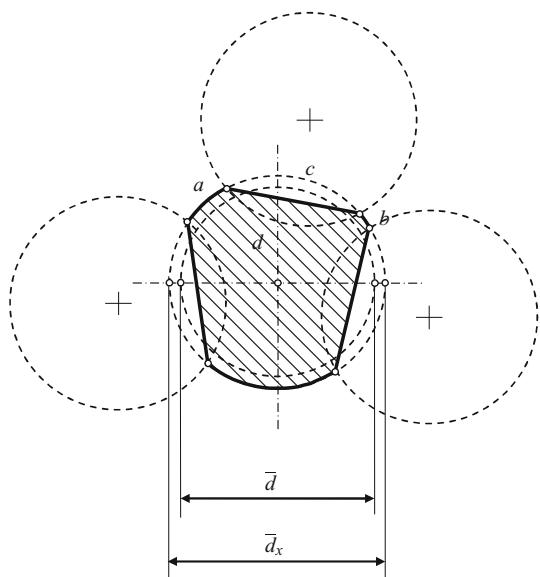


Рис. 3. Геометрическая модель карбидного скелета твердого сплава

Затем, зная содержание карбидной фазы V и число карбидных частиц N в единице объема сплава, можно вычислить средний объем одной частицы

$$\bar{v} = \frac{36\pi}{(S/V)^3} \frac{(1-V)^3}{(1-V/2)^2} \quad (7)$$

и ее диаметр в сферическом приближении

$$\bar{d} = 6 \frac{1-V}{S/V} \left(1 - \frac{V}{2}\right)^{-\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет выполнить расчетную оценку истинного размера карбидных частиц в твердых сплавах по значениям интегральных металлографических характеристик карбидной фазы — ее относительной удельной поверхности (S/V) и удельному объему V .

Расчеты для сплавов на основе Cr_3C_2 с различным содержанием титановой связки показали, что с увеличением интенсивности воздействия ударных волн на порошок (ростом максимального давления ударно-волнового сжатия) средний размер частиц карбидной фазы увеличивается, достигает исходного значения (около 3,5 мкм) и перестает изменяться (рис. 4, а).

При этом установлено, что независимо от содержания связки в исходной смеси порошков средний диаметр частиц карбидной фазы в полученных взрывом материалах оказывается однозначно связанным с их пористостью (рис. 4, б). Объяснить этот факт можно, если предположить, что механизм дробления карбидных частиц аналогичен механизму образования

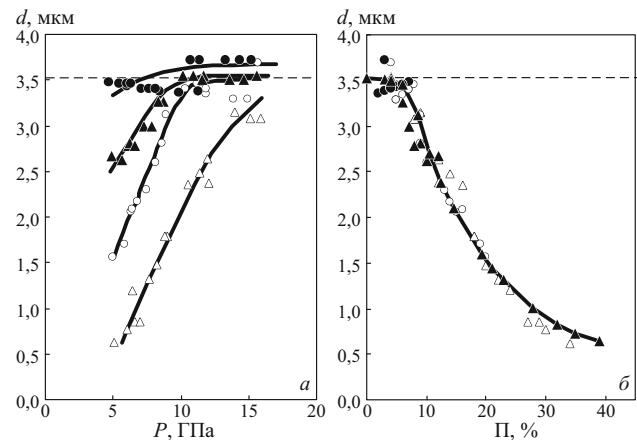


Рис. 4. Связь среднего диаметра зерен карбидной фазы в сплавах $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$ с интенсивностью взрывной обработки (а) и остаточной пористостью (б): \triangle — Cr_3C_2 — 20 % об. Ti; \circ — Cr_3C_2 — 30 % об. Ti; \blacktriangle — Cr_3C_2 — 40 % об. Ti; \bullet — Cr_3C_2 — 50 % об. Ti; — исходное значение

откольных трещин при выходе ударных волн на свободные поверхности массивных образцов, а пористость как раз и связана с вероятностью этого выхода при прохождении по порошку отраженных ударных волн.

Таким образом, для получения твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами путем взрывного нагружения, обеспечивающего близкую к нулевой пористость прессовок, необходимо, чтобы гранулометрический состав исходной смеси порошков заранее соответствовал оптимальному размеру зерна в структуре порошкового твердого сплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крохалев А. В., Харламов В. О., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 5. № 4. С. 117 – 122.
2. Крохалев А. В., Харламов В. О., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Закономерности формирования твердых сплавов из смесей порошков карбида хрома с титаном с использованием энергии взрыва / Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012. № 1. С. 32 – 37.
3. Крохалев А. В., Харламов В. О., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Авдеюк О. А., Севостьянова А. В. Особенности формирования твердых сплавов из смесей порошков карбида хрома с титаном при взрывном прессовании / Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т. 13. С. 18 – 23.
4. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. — М.: Металлургия, 1976. — 272 с.
5. Мартин Дж., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1978. — 280 с.
6. Чернявский К. П. Стереология в металловедении. — М.: Металлургия, 1977. — 280 с.