

УДК: 537.528:621.762.3:[669.295+669.1]:669.018.25

Е.В. Липян, О.Н. Сизоненко*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины***ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ПОДГОТОВКА ШИХТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
КАРБИДОТИТАНОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ**

Рассмотрен метод высоковольтной электроразрядной (ВЭР) подготовки шихты из смеси состава 80% Ti + 20% Fe для получения карбидтитановых твердых сплавов методом искро-плазменного спекания. Установлена связь параметров ВЭР со свойствами получаемой порошковой шихты (дисперсность и форма частиц, фазовый состав, насыпная плотность) и физико-механическими свойствами спеченных из нее материалов (гидростатическая плотность, твердость, теплопроводность, износостойкость, динамическая прочность).

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, твердый сплав, безвольфрамовый твердый сплав, порошок, функциональные свойства, диспергирование, синтез, искро-плазменное спекание, карбид титана

Є.В. Липян, О.М. Сизоненко*Институт імпульсних процесів і технологій НАН України***ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНА ПІДГОТОВКА ШИХТИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ
КАРБИДОТИТАНОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ**

Розглянуто метод високовольтної електророзрядної (ВЕР) підготовки шихти з суміші складу 80 % Ti + 20% Fe для отримання карбідтитанових твердих сплавів методом іскро-плазмового спікання. Встановлено зв'язок параметрів ВЕР з властивостями одержуваної порошкової шихти (дисперсність і форма частинок, фазовий склад, насипна щільність) і фізико-механічними властивостями спечених з неї матеріалів (гідростатична густина, твердість, теплопровідність, зносостійкість, динамічна міцність).

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, твердий сплав, безвольфрамовий твердий сплав, порошок, функціональні властивості, диспергування, синтез, іскро-плазмове спікання, карбід титану

Ye. Lypian, O. Sizonenko*NASU Institute of Pulse Processes and Technologies***ELECTRIC DISCHARGE PREPARATION OF THE POWDER MIXTURE
FOR TITANIUM CARBIDE HARD METALS OBTAINMENT**

The paper deals with the high voltage electric discharge (HVED) method of the powder mixture preparation of the initial 80 % Ti + 20 % Fe powders for obtaining of titanium carbide tungstenless hard metals after spark plasma sintering. The properties of the obtained powders (dispersity and shape of the particles, phase composition, bulk density) and sintered materials (hydrostatic density, hardness, thermal conductivity, wear resistance, dynamic strength) were examined. The impact of the parameters of the HVED for powder mixture preparation on the properties of obtained sintered materials was established. Optimal values of the specific energy of the HVED influence on the powders for obtaining the best functional properties of the titanium carbide hard metals were found.

Keywords: high voltage electric discharge, hard metal, tungstenless cemented carbide, powder, functional properties, crashing, synthesis, spark plasma sintering, titanium carbide

Постановка проблеми. Твердые сплавы (ТС) широко и эффективно они применяются для обработки металлов резанием, давлением, для бурения горных пород в нефтяной, газовой и горнодобывающей промышленности, в качестве износостойких и штамповых материалов, а также для службы при высоких температурах и агрессивных средах [1–5].

Наибольшее применение нашли ТС на основе карбида вольфрама с кобальтом. Однако в настоящее время полностью обеспечить промышленность такими материалами не представляется возможным из-за дефицитности и высокой стоимости вольфрамового и кобальтового сырья. Поэтому в настоящее время внимание исследователей направлено на разработку и внедрение ТС, не содержащих вольфрам – безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС), которые как правило не содержат также кобальта, заменяемого никелем или железом [1, 4–5].

В основном разработка БВТС сосредоточена на создании материала на основе сложного титано-ниобиевого карбида с никель-молибденовой связкой (типа ТМ), карбида титана с никель-молибденовой связкой (МНТ, ТН, НТН и др.), карбонитрида титана с никель-молибденовой связкой (КНТ, ЛЦК-20, ЦТУ, ТВ и др.), карбида хрома с никелевой связкой, карбида и карбонитрида титана со стальной связкой (карбидостали, ферротикары), а также ТС на некарбидной основе (керметы и др.). Для перечисленных вариантов, кроме случая применения карбида и карбонитрида титана со стальной связкой, имеют место сложность и дороговизна производства материала. Вместе с тем, БВТС в сравнении со стандартными вольфрамсодержащими сплавами обычно имеют более низкий модуль упругости, меньшую

теплопроводность и ударную вязкость, поэтому они хуже сопротивляются ударным и тепловым нагрузкам, упругим и пластическим деформациям, имеют пониженную жаропрочность, более интенсивно разупрочняются при повышенных температурах, имеют повышенный абразивный износ по задней поверхности режущего инструмента. Необходимо отметить, что применение БВТС для замены вольфрамсодержащих ТС зачастую не приводит к существенному техническому или экономическому эффекту [1, 4–6].

Существует подход, позволяющий повысить физико-механические и эксплуатационные свойства материалов, который может быть применен при подготовке порошков к консолидации при получении БВТС. Таким методом является высоковольтный электрический разряд (ВЭР) в жидкости, благодаря которому можно целенаправленно воздействовать на фазовый и дисперсный состав порошков, в частности, смесей Fe–Ti, что приводит к повышению функциональных свойств консолидированного из них материала [7–14]. Теоретическая оценка на основе термодинамического анализа и экспериментальные исследования подтвердили изменение фазового состава смеси порошков железа и титана под воздействием ВЭР в углеводородной жидкости. В работе [14] показано, что ВЭР приводит к деструкции плазменным каналом углеводородной жидкости на наночастицы углерода и водорода и интенсифицирует протекание реакций между компонентами порошковой смеси и продуктами разложения углеводородной жидкости с синтезом карбидов титана и железа, а также их интерметаллидов. Авторами работы была успешно применена технология воздействия ВЭР на порошковые смеси железа, титана и карбида бора в углеводородной жидкости для получения шихты для производства карбидосталей [15]. Сочетание ВЭР воздействия на порошки с последующим искро-плазменным спеканием (ИПС) синтезированной шихты позволило сохранить мелкозернистую структуру компакта и обеспечить повышение физико-механических свойств карбидостали [10, 12].

Поэтому использование ВЭР воздействия на порошки состава 80 % Ti + 20 % Fe может дать возможность синтезировать достаточное количество карбида титана в шихте и консолидированном материале и позволит создать БВТС на основе карбида титана с железной и титановой связкой с повышенными функциональными свойствами.

Целью данной работы является установление связи параметров ВЭР обработки в керосине смеси порошков титана и железа с функциональными свойствами консолидированных твердосплавных материалов методом ИПС.

Методика исследования. ВЭР воздействию подвергалась порошковая смесь состава 80 % Ti + 20 % Fe. Обработка суспензии порошков титана ПТ 6 ТУ У 14-10-026-98 и железа ПЖР 3.200.26-30 ГОСТ 9849–86 в керосине марки ТС-1 ГОСТ 10227–86 выполнялась на экспериментальном стенде в рабочей камере, схема и подробное описание которых приведены в [7, 12]. Параметры ВЭР воздействия были выбраны, в соответствии с работами [7–14], при этом удельная энергия $W_{уд}$ варьировалась от 4,5 до 27 МДж/кг за счет изменения количества импульсов.

Для оценки влияния параметров ВЭР обработки на морфологию и дисперсность частиц применялся металлографический анализ по цифровым фотоснимкам, выполненным на оптическом микроскопе БИОЛАМ-И и растровом электронном микроскопе РЭММА-102 по ГОСТ 23402–78. Пробы порошка для микроскопии отбирались в соответствии с ГОСТ 23148–98 (ISO 3954–77). Дифференциальная кривая распределения диаметра частиц по их количеству $F_d(d) = dF/dD$ строилась путем дифференцирования интегральной накопительной кривой, сглаживание производилось методом последовательного применения, скользящего среднего с окном в две точки с предварительным разделением на интервалы размером 0,05 мкм. Исследование фазового состава порошков выполнялось методом рентгенофазового анализа. Регистрация дифрактограмм осуществлялась при помощи дифрактометра Rigaku Ultima IV при $CuK\alpha$ излучении. Идентификация фаз на дифрактограммах осуществлялась с применением программы QualX [16]. Насыпная плотность порошков определялась по ГОСТ 19440–94 (ISO 3923-1–79) с использованием воронки.

Спекание порошков выполнялось на экспериментальном комплексе ИПС «Гефест–10» при максимальной амплитуде суперпозиции постоянного и переменного тока 1,1 кА, частоте переменной составляющей 10 кГц, скорости нарастания температуры 20 °С/с и времени выдержки 270 с (общее время), механическое давление при спекании 60 МПа в соответствии с работами [10, 11].

Плотность консолидированных образцов определялась гидростатическим взвешиванием в этиловом спирте по ГОСТ 20018–74 (ISO 3369–75). Твердость образцов исследовалась по ГОСТ 20017–74 (ISO 3738/1–82) на твердомере ТР 5006. Динамическая прочность исследовалась

по диаграмме сжатия образцов, полученной при помощи экспериментальной установки для динамических испытаний по методу Гопкинсона-Кольского [17]. Износостойкость образцов определялась весовым методом на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик–колодка» при сухом трении (без смазки) [18]. Пары трения являлись неподвижный цилиндрический образец (колодка) и контр-тело (ролик) подвижный круг алмазный плоский прямого профиля марки 1A1 Ф50×16×3×16 АС4 зернистостью 160/80 по ГОСТ 16167–90. Окружная скорость ролика 0,8 м/с, давление на образец – 0,75 МПа. Предварительно производилась притирка контактирующих поверхностей. При исследованиях образцы взвешивались через каждые 0,5 км пути. Теплопроводность системы «стекло – образец» определялась на измерителе теплопроводности ИТ-λ-400 в соответствии с [19]. При измерениях использовалось стекло органическое по ГОСТ 17622–72 толщиной 0,8 мм, поскольку теплопроводность самих образцов была слишком высокой для измерений на указанном приборе.

Результаты и их обсуждение. Микроскопические исследования морфологических характеристик показали, что размер исходной смеси порошков 80 % Ti + 20 % Fe составил от 0,5 до 160 мкм (рис. 1, кривая 1). Медиана распределения имеет значение ~ 43 мкм и средний диаметр 37,5 мкм.

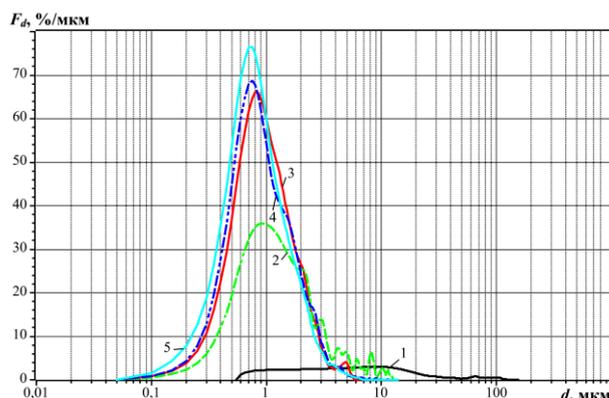


Рис. 1. Дифференциальные кривые распределения диаметра частиц смеси порошка 80 % Ti + 20 % Fe по их количеству до (1) и после ВЭР воздействия с удельной энергией 4,5 (2), 9 (3), 18 (4) и 27 МДж/кг (5)

ВЭР обработка порошков с удельной энергией воздействия 4,5 МДж/кг приводит к существенному изменению дисперсности порошковой смеси (рис. 1, кривая 2), размеры частиц находятся в диапазоне от ~ 0,1 мкм до 13,5 мкм, при этом медиана распределения составляет 2,2 мкм а средний размер 3,2 мкм. Пиковое значение диаметра соответствует 1 мкм и составляет 36 %.

Повышение удельной энергии воздействия до 9 МДж/кг (рис. 1, кривая 3) изменяет размеры частиц – диапазон составляет от ~ 0,1 мкм до 12,5 мкм, медиана 1,3 мкм, средний диаметр 1,6 мкм. Пиковое значение диаметра соответствует 0,8 мкм и составляет 66 %.

С увеличением удельной энергии воздействия в два раза до 18 МДж/кг динамика диспергирования снижается, частицы порошка измельчаются до размеров от ~ 0,1 мкм до 6,5 мкм, при этом медиана распределения 1,3 мкм, а средний диаметр 1,56 мкм (рис. 1, кривая 4). Пиковое значение диаметра соответствует 0,75 мкм и составляет 69 %.

Дальнейшее повышение удельной энергии воздействия до 27 МДж/кг не приводит к существенному изменению дисперсности по сравнению с воздействием при 18 МДж/кг (рис. 1, кривая 5).

Установлено, что ВЭР обработка смеси 80 % Ti + 20 % Fe оказывает влияние не только на дисперсность, но и на форму частиц. Несмотря на уменьшение динамики диспергирования с увеличением энергии воздействия значительно возрастает доля сферических и округлых частиц. Так, если для исходного порошка содержание частиц сферической формы составляло 15,5 %, округлой 61,5 %, угловатой 22,5 % и присутствовало незначительное количество частиц стержневой формы, то при ВЭР обработке при повышении удельной энергии воздействия с 9 до 18 МДж/кг содержание сферических частиц возрастает с 35 до 46 % за счет уменьшения количества частиц округлой (с 56,5 до 50 %), угловатой (с 8,5 до 4 %) и стержневой формы, причем основная масса мелких частиц имеет именно сферическую форму.

Дифрактограммы, полученные при исследовании порошков (рис. 2), свидетельствуют о том, что ВЭР воздействие на порошковую смесь приводит к образованию и увеличению количества карбида титана по мере увеличения удельной энергии за счет взаимодействия между компонентами порошковой смеси и синтезируемым нанокремнеземом. При этом при воздействии с минимальной рассматриваемой энергией ($W_{уд} = 9$ МДж/кг) наблюдается наличие свободного углерода, не успевшего вступить в реакцию карбидизации (рис. 2, б). При воздействии с максимальной рассматриваемой энергией ($W_{уд} = 27$ МДж/кг) карбид титана начинает разлагаться на титан и углерод при попадании в плазму канала разряда (рис. 2, д).

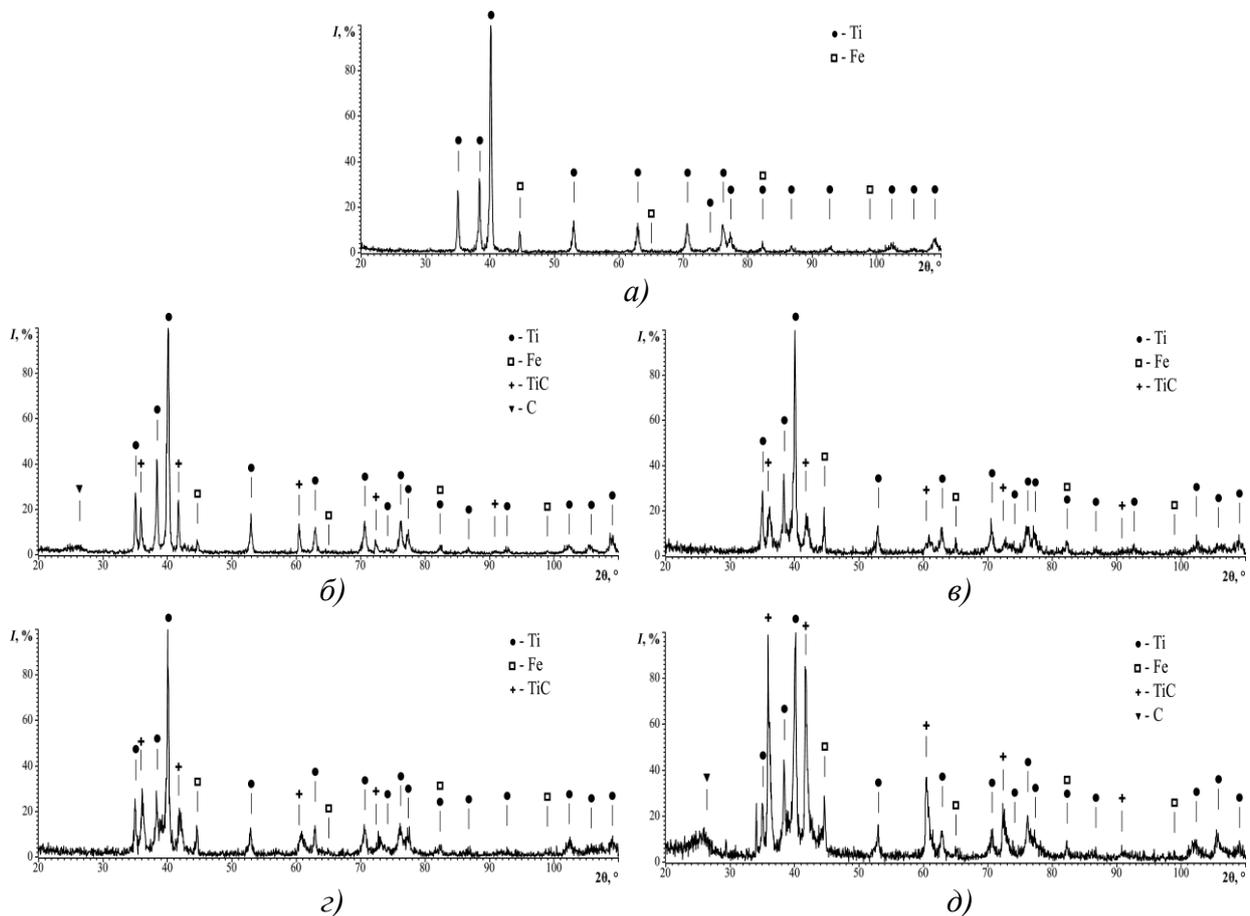


Рис. 2. Дифрактограммы смеси порошков исходного состава 80 % Ti + 20 % Fe до (а) и после ВЭР воздействия с удельной энергией 4,5 (б), 9 (в), 18 (г) и 27 МДж/кг (д)

Наличие в составе смеси свободного углерода, не успевшего вступить в реакцию карбидизации при недостаточной удельной энергии (9 МДж/кг) или образовавшегося в результате разложения карбида титана при энергии избыточной (27 МДж/кг) приводит к уменьшению насыпной плотности шихты ρ_n относительно исходной (рис. 3). При этом значения насыпной плотности шихты, полученной при средних значениях удельной энергии (9 и 18 МДж/кг), остается на уровне значений исходного порошка за счет одновременного синтеза карбида титана и увеличения дисперсности частиц.

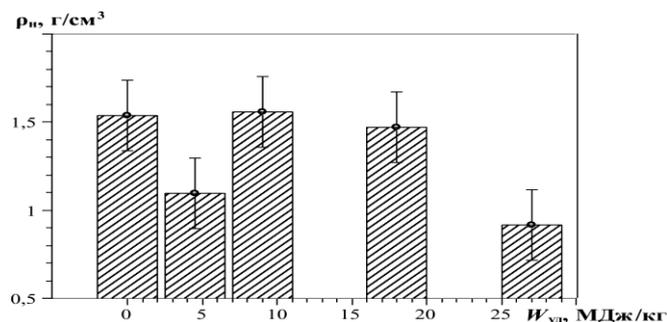


Рис. 3. Насыпная плотность порошка исходного состава 80 % Ti + 20 % Fe до и после ВЭР воздействия с разной удельной энергией

Наличие в составе шихты свободного углерода, полученной при ВЭР воздействии с удельной энергией 9 и 27 МДж/кг также снижает гидростатическую плотность компактов, консолидированных из этой шихты методом ИПС (рис. 4, а).

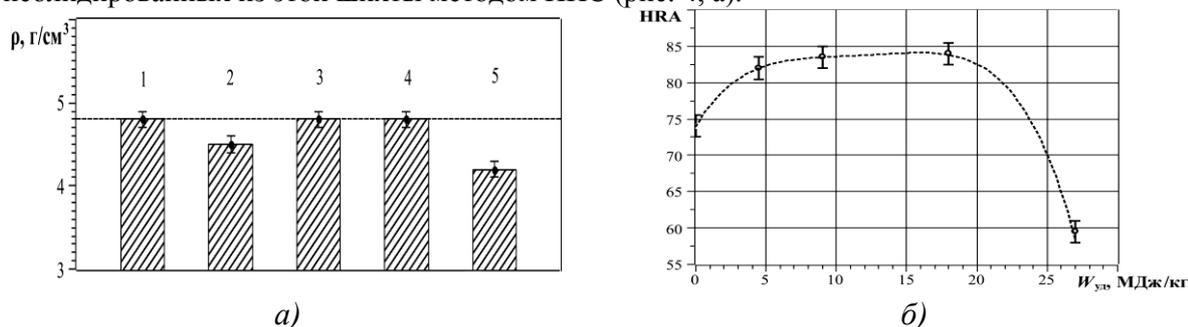


Рис. 4. Плотность (а) и твердость (б) образцов БВТС, спеченных из порошка исходного (1) и после ВЭР воздействия с удельной энергией 4,5 (2), 9 (3), 18 (4) и 27 МДж/кг (5)

Следует отметить, что все полученные материалы обладают небольшой плотностью ($\sim 4,8$ г/см³) по сравнению с традиционными ТС по ГОСТ 3882–74 (ISO 513–75) вольфрамовой (от 13,4 до 15,3 г/см³), титановольфрамовой (от 9,5 до 13,1 г/см³) и титанотанталовольфрамовой (от 12,0 до 13,8 г/см³) групп.

Средние значения твердости образцов, консолидированных из шихты, полученной ВЭР подготовкой при значениях увеличении удельной энергии воздействия 4,5; 9 и 18 МДж/кг составляют соответственно 74; 82 и 83,5 HRA (рис. 4, б). В соответствии со стандартом ГОСТ 17359–82, порошковым твердым сплавом является порошковый материал на основе металлоподобных твердых соединений с металлической связкой, обладающий твердостью свыше 80 HRA. Таким образом, полученные материалы относятся к классу твердых сплавов. Состав шихты, полученной при ВЭР воздействии с $W_{уд} = 27$ МДж/кг за счет образования излишнего углерода, образовавшегося при разложении карбида титана, попавшего в плазменные каналы, приводит к существенному уменьшению среднего значения твердости спеченного из нее материала до 59,5 HRA.

Для образцов, спеченных их исходного порошка, потеря массы при абразивном износе составляет 4,2 г на 1 км пути (рис. 5, а). Обработка порошков при значениях удельной энергии 4,5 и 9 МДж/кг приводит к повышению сопротивления абразивному износу консолидированного из такой шихты материала – $m_w = 3,1$ г/км. Повышение удельной энергии обработки до 18 МДж/кг способствует снижению потери массы компакта до 1,5 г/км. Дальнейшее повышение удельной энергии до 27 МДж/кг приводит к резкому падению износостойкости спеченного из такой шихты материала – до $m_w = 6$ г/км.

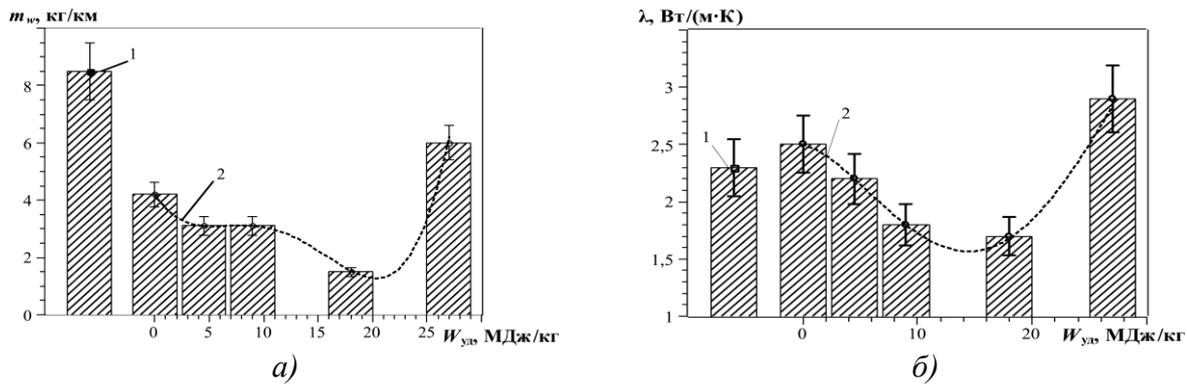


Рис. 5. Потеря массы при абразивном износе (а) и теплопроводность системы «органическое стекло – образец» (б) для твердого сплава марки ВК8 (1) и полученных БВТС (2)

При этом проведенные испытания на абразивный износ для образца из сплава марки ВК8 показали, что для промышленного твердого сплава наблюдается значительный абразивный износ – потеря массы составила $\sim 8,5$ г на 1 км пути. Очевидно, что условия испытаний при использовании стального контртела отличаются от применяемых в данной работе (где контртело – алмазный круг), когда более выражены явления «вырывания» упрочняющих частиц карбидов из металлической матрицы. В этих условиях полученные образцы карбидтитанового твердого сплава превосходят промышленные твердые сплавы по износостойкости.

Поскольку одной из важных характеристик ТС является теплопроводность, было выполнено исследование зависимости изменения теплопроводности системы «органическое стекло – твердый сплав» λ для исследуемых карбидтитановых твердых сплавов, и для образца промышленного твердого сплава марки ВК8 (рис. 5, б). уменьшается для образцов, спеченных из шихты, обработанной По мере увеличения удельной энергии воздействия до 18 МДж/кг при обработке шихты, значение теплопроводности спеченных из нее образцов уменьшается из-за увеличения содержания карбида титана. При повышении удельной энергии воздействия при подготовке шихты до 27 МДж/кг, теплопроводность образцов, консолидированных из нее, резко возрастает, вследствие содержания свободного углерода в компакте. Значения теплопроводности полученных карбидтитановых твердых сплавов и промышленного твердого сплава марки ВК8 (см. рис. 5, б, столбик 1) достаточно близки. Карбид вольфрама имеет большее значение теплопроводности, чем карбид титана, что соответственно сказывается на разнице свойств содержащих их твердых сплавов.

Исследование динамической прочности консолидированных образцов (рис. б) показало, что для образца, консолидированного из порошка, обработанного при удельной энергии воздействия 4,5 МДж/кг, при скорости деформирования ~ 800 с⁻¹ величина динамического предела прочности составила ~ 1250 МПа, энергия деформирования в момент начала разрушения составила 50 МДж/м³. Образцы, спеченные из порошка, обработанного при удельной энергии воздействия 9 и 18 МДж/кг, при скоростях деформирования, достигающих до ~ 400 и ~ 800 с⁻¹ соответственно, не разрушились, максимальная энергии деформации при этом составляла соответственно ~ 40 и ~ 70 МДж/м³. Для образца, консолидированного из порошка, обработанного при удельной энергии воздействия 27 МДж/кг при скорости деформирования ~ 800 с⁻¹ вследствие наличия в составе избыточного углерода резко снижается величина динамического предела прочности до ~ 300 МПа, а энергия деформирования в момент начала разрушения до 10 МДж/м³.

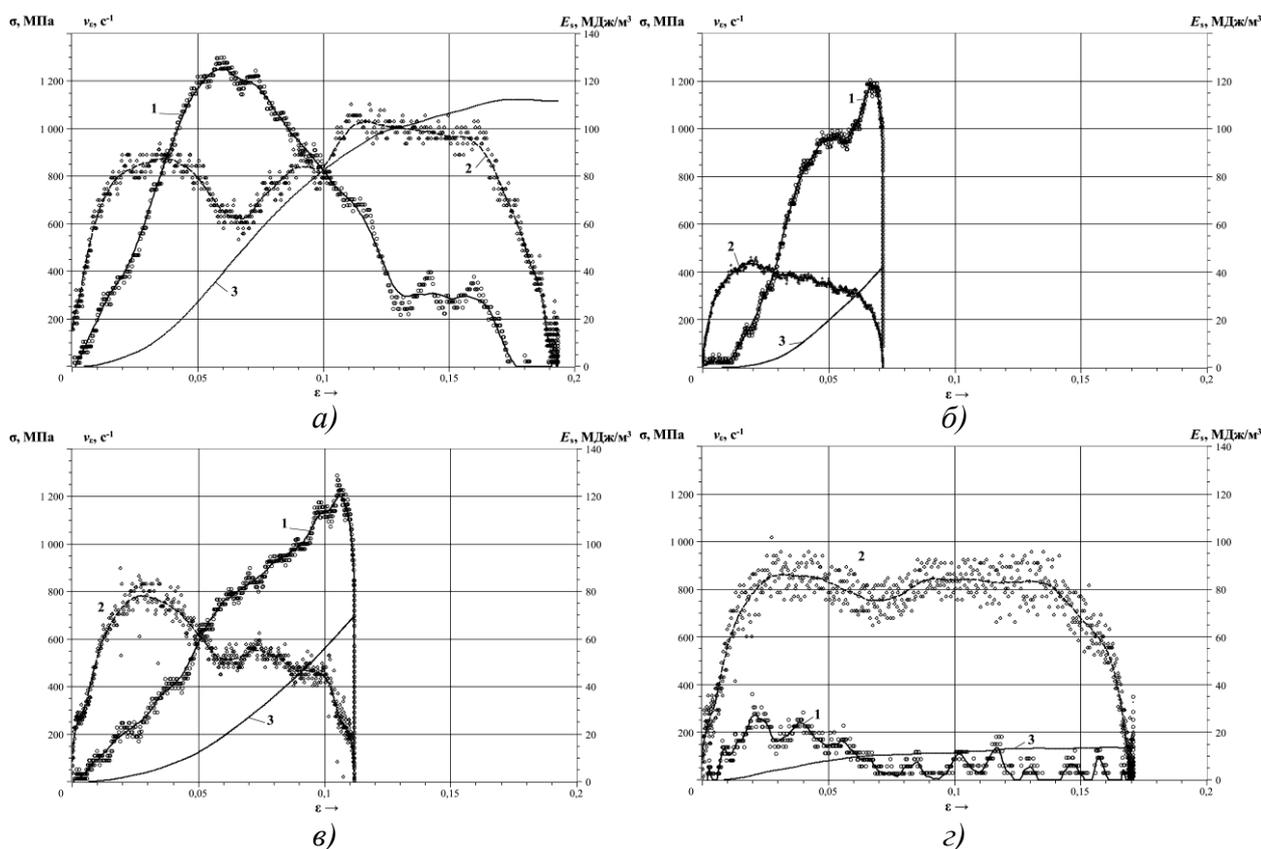


Рис. 6. Диаграммы напряжения (1), скорости (2) и энергии деформирования (3) от величины деформации образцов БВТС, спеченных из порошка после ВЭР воздействия с удельной энергией 4,5 (а), 9 (б), 18 (в) и 27 МДж/кг (з)

Рассматривая комплекс функциональных свойств получаемых материалов, можно сделать вывод, что оптимальными характеристиками обладают БВТС, консолидированные из шихты, полученной ВЭР подготовкой порошков при значениях удельной энергии от 9 до 18 МДж/кг.

Выводы. Определено влияние параметров ВЭР обработки порошковой смеси состава 80 % Ti + 20 % Fe на изменение их дисперсности и фазового состава.

Установлена связь параметров ВЭР обработки порошков с функциональными свойствами (твёрдость, динамическая прочность, износостойкость, теплопроводность) консолидированных ИПС БВТС материалов, которые имеют высокие удельные характеристики прочности и износостойкости, а их твёрдость превышает 82 НРА.

Список использованных источников:

1. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них : учеб. пособ. для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувиллин. – М. : МИСИС, 2001. – 428 с. – ISBN 5-87623-076-6.
2. Фальковский, В. А. Твердые сплавы / В. А. Фальковский, Л. И. Клячко. – М. : Руда и металлы, 2005. – 416 с. – ISBN 5-8216-0067-7.
3. Металлические порошки и порошковые материалы : справ. / Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов [и др.] ; под ред. Ю. В. Левинского. – М. : ЭКОМЕТ, 2005. – 520 с. – ISBN 5-89594-122-2.
4. Кюбарсепп, Я. Твердые сплавы со стальной связкой / Я. Кюбарсепп. – Таллинн : Валгус, 1991. – 164 с. – ISBN 5-440-00303-7.
5. Витрянюк, В. К. Спеченные безвольфрамовые твердые сплавы / В. К. Витрянюк, А. Н. Степанчук. – К. : Випол, 2011. – 248 с. – ISBN 978-966-646-108-0.
6. Гуревич, Ю. Г. Карбидостали / Ю. Г. Гуревич, В. К. Нарва, Н. Р. Фраге. – М. : Metallurgy, 1988. – 144 с.
7. Effect of high-voltage discharge on the particle size of hard alloy powders / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2011. – Vol. 49, Issue 11/12. – P. 630–636. – ISSN 1068-1302.
8. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, Issue 3/4. – P. 129–136. – ISSN 1068-1302.
9. Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Issue 5/6. – P. 247–253. – ISSN 1068-1302.

10. High voltage electric discharge in liquid as a method of preparation of blend for carbide steels / O. N. Sizonenko, E. G. Grigoriev, A. D. Zaichenko [et al] // *Machines, Technologies, Materials*. – 2013. – Issue 10. – P. 19–22. – ISSN 1313-0226.
11. Разрядно-импульсная технология обработки порошков / А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий [и др.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Техніка та електрофізика високих напруг : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50 (1092). – С. 151–160. – ISSN 2079-0740.
12. Pulsed-discharged technology of metal-matrix composite materials obtainment / O. Sizonenko, A. Zaichenko, A. Torpakov [et al] // *Materials Science. Non-equilibrium phase transformations*. – 2015. – Issue 1. – P. 15–18. – ISSN 2367-749X.
13. Electric discharge synthesis of titanium carbide / O. Syzonenko, E. Shregii, S. Prokhorenko [et al] // *Machines, Technologies, Materials*. – 2016. – Issue 8. – P. 34–37. – ISSN 1313-0226.
14. Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов / Е. В. Липян, О. Н. Сизоненко, А. С. Торпаков, А. А. Жданов // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Техніка та електрофізика високих напруг : зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 51 (1160). – С. 59–65. – ISSN 2079-0740.
15. Пат. 111411 Україна, МПК (2016.01) B02C 19/18 (2006.01), B22F 9/14 (2006.01), B22F 3/14 (2006.01), C01B 31/30 (2006.01), C22C 21/00, C22C 1/04 (2006.01). Спосіб одержання металоматричних композиційних матеріалів / Сизоненко О. М., Липян Є. В., Зайченко А. Д., Торпаков А. С., Присташ М. С., Трегуб В. О.; заявник і патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № a201409976; заявл. 11.09.14; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8.
16. Altomare, A. QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW_COD / A. Altomare, N. Corriero, C. Cuocci [et al] // *Journal of Applied Crystallography*. – 2015. – Vol. 48. – P. 598–603. – ISSN 1600-5767.
17. Lindholm, U. S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar / U. S. Lindholm // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1964. – № 12. – P. 317–335. – ISSN 0022-5096.
18. Ясь, Д. С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование / Д. С. Ясь, В. Б. Подмоков, Н. С. Дяденко. – К. : Техніка, 1971. – 140 с.
19. Эксплуатационная документация на измеритель теплопроводности ИТ-Л-400. – Актюбинский завод «Эталон», 1987. – 38 с.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2017