

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 2.4807.2011 и при поддержке гранта РФФИ (проект № 13-02-12009 офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Полмеар Я. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. М.: Техносфера, 2008.
2. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. Теория. Технология. Оборудование: Учеб. пос. для вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2004.
3. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. М.: Мир, 2000.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк: СибГИУ, 2007.
5. Карпий С.В., Морозов М.М., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010.
6. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / Под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: Изд-во «Интеркузбасс», 2011.
7. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. // Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams / Ed. Y. Pauleau. Oxford: Elsevier, 2006. P. 205.
8. Глезер А.М., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шаркеев А.П. Наноматериалы: структура, свойства, применение. Новокузнецк: Изд-во «Интеркузбасс», 2012.
9. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009.
10. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. // Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под ред. А.И. Потекаева. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345.
11. Энгеле Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Спр. изд. / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1986.
12. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности / Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
13. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973.

УДК 621.762

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА С УЧАСТИЕМ РАЗЛИЧНЫХ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

© 2013 г. В.П. Рева, Д.В. Онищенко

Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), г. Владивосток

Установлено, что основными критериями реализации механохимического синтеза карбида вольфрама являются структура углеродных модификаций и степень их ароматичности. Показана перспективность использования модификаций углерода, полученных в результате пиролиза растительного сырья, для синтеза карбида вольфрама с минимальным содержанием серы.

Ключевые слова: карбид вольфрама, механохимический синтез, пиролиз растительного сырья, модификации углерода, степень ароматичности.

It has been established that the basic criteria of realization of mechano-chemical tungsten carbide synthesis are the structure of carbon modifications and the degree of their aromaticity. The prospects of application of carbon modifications obtained as a result of pyrolysis of vegetative raw materials for synthesis of tungsten carbide with minimum contents of sulfur are shown.

Key words: tungsten carbide, mechano-chemical synthesis, pyrolysis of vegetative raw materials, carbon modification, degree of aromaticity.

Рева В.П. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии материалов и материаловедения Инженерной школы ДВФУ (690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10). Тел.: (423) 290-20-97. E-mail: Festurvp@mail.ru.

Онищенко Д.В. – канд. техн. наук, зав. лабораторией материаловедения и технологии наноматериалов ДВФУ, ст. преподаватель кафедры нефтегазового дела и нефтехимии Инженерной школы ДВФУ. Тел.: (423) 298-15-50. E-mail: Ondivl@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Создание тугоплавких соединений с высоким уровнем эксплуатационных характеристик является одним из приоритетных направлений в современном материаловедении и порошковой металлургии.

Карбид вольфрама относится к группе материалов большой промышленной важности и представляет собой карбидную фазу, образованную наиболее тугоплавкими металлом (вольфрамом) и неметаллом (углеродом), что ставит его в особое положение среди других металлоподобных карбидов. Кроме высокой твердости WC имеет уникальные свойства: высокую температуру плавления, хорошую сопротивляемость износу и термическому удару, а также устойчивость к окислению [1].

Перспективным способом получения карбида вольфрама является метод проведения твердофазной реакции. Его отличают сравнительная простота осуществления процесса, возможность протекания реакции в отсутствие растворителей. Однако при термической активации твердофазной реакции ее скорость низкая, так как она определяется скоростью диффузионных процессов. Механическая активация значительно ускоряет процессы химического взаимодействия между твердыми реагентами [2]. В большей степени это относится к высокотемпературному механохимическому синтезу (МХС), когда твердофазная реакция происходит непосредственно во время механической обработки.

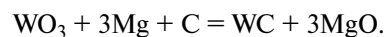
В настоящее время высокотемпературным механохимическим синтезом получен целый ряд тугоплавких соединений. Однако механизм образования карбидов в ходе МХС остается малоизученным. Недостаточно полно исследовано влияние внешних факторов на инициирование механохимических реакций, не определены лимитирующие факторы образования WC [3–5]. Поиск эффективных модификаций углерода со специфическим комплексом свойств, от которых зависит химический состав синтезируемого соединения, также представляет несомненный интерес при формировании тугоплавких соединений. Среди эффективных модификаций углерода следуют отметить продукты пиролиза, полученные из возобновляемого растительного сырья — отходов сельскохозяйственных культур, которые в больших количествах (20–30 млн т) скапливаются на перерабатывающих предприятиях и нуждаются в комплексной переработке. По сравнению с модификациями углерода, полученными из

углеводородного сырья, данные продукты имеют специфический химический состав и хороший комплекс физико-химических, механических и технологических свойств [6].

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являлось исследование лимитирующих факторов механохимического синтеза карбида вольфрама, реализуемого с применением различных углеродных компонентов: сажи, активированного угля, природного графита, а также модификаций углерода из возобновляемого растительного сырья.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез карбида вольфрама осуществляли в соответствии с реакцией



Использовались оксид вольфрама марки ХЧ и магний чистотой 99,95 %, а в качестве углеродсодержащего материала — сажа марки ПМ-15, природный графит с зольностью не более 1 % и степенью ароматичности $f_a = 60,2$, а также активированный уголь медицинского назначения нескольких производителей: ОАО «Медисорб» (г. Пермь), ОАО «Фармстандарт—лекарства» (г. Курск), ОАО «Уралбиофарм» (г. Екатеринбург) и ОАО «Химико-фармацевтический завод» (г. Ирбит). Графит и сажа ПМ-15 предварительно просушивались при температуре 150 °С в течение 3 ч, а активированный уголь использовался в состоянии поставки. Степень ароматичности последнего составляла от 58,9 (ОАО «Медисорб») до 63,5 (ОАО «Химико-фармацевтический завод»).

В качестве исходных материалов для приготовления модификаций углерода применяли возобновляемое растительное сырье (отходы сельскохозяйственных культур): шелуху овса (сорт «Аллюр») и пшеницы (сорт «Добрыня»), а также мох бурый (*Sphagnum fuscum*). Были получены модификации углерода с аморфной, аморфно-кристаллической и кристаллической структурами при температурах пиролиза $t_{\text{пир}} = 950, 1150, 1300$ и 1500 °С. Их удельная поверхность (согласно одноточечному методу БЭТ) составляла $S_{\text{уд}} = 140 \div 220 \text{ м}^2/\text{г}$.

Активацию исходных компонентов суммарной массой 30 г и механохимический синтез WC осуществляли в герметичном контейнере (механореакторе) энергонапряженной вибромельницы [7], работающей при частоте колебаний 750 мин^{-1} и амплитуде 90 мм. В качестве размалывающих тел при-

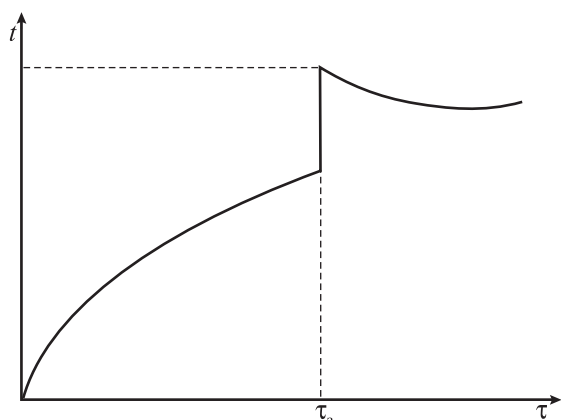


Рис. 1. Термограмма механохимического синтеза

менялись шары из стали ШХ15 диаметром 14 мм. Интенсивность измельчения составляла 1 : 15.

О прохождении синтеза судили по скачкообразному повышению температуры в механореакторе, измеряемой на его внешней стенке с помощью инфракрасного лазерного пирометра С-20.1, после чего виброобработка прекращалась. Полученный продукт подвергался отмывке в растворе соляной кислоты плотностью 1,15 г/см³.

Кинетика процесса МХС карбида вольфрама исследовалась по термограммам «температура механореактора — время задержки синтеза (τ_3)» (рис. 1).

Протекание механохимического синтеза сопровождалось скачкообразным повышением температуры, что обусловлено экзотермическими эффектами реализуемых химических реакций. Температура внешних стенок механореактора, фиксируемая с помощью лазерного пирометра, непосредственно после прохождения МХС карбида вольфрама составляла 90–110 °С.

Фазовый состав синтезированных модификаций углерода и образцов WC определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE (Германия) в CuK_α -излучении по стандартной методике. Идентификацию соединений, входящих в состав исследуемых образцов, выполняли в автоматическом режиме поиска EVA с использованием банка порошковых данных PDF-2.

Распределение частиц по размеру, гранулометрический состав устанавливали с помощью лазерного анализатора частиц «Анализетте 22» NanoTec/MikroTec/XT фирмы «Fritsch» (Германия). Морфологию углеродсодержащего сырья и порошка карбида вольфрама исследовали с применением инвертированного металлографического микроскопа МТ 8530 фирмы «Meiji Techno» (Япония), оснащен-

ного программой Thixomet PRO (Россия). Фрагментарный состав модификаций углерода оценивали с помощью ЯМР-спектрометра Mercury 300 plus фирмы «Varian» (США), а их структуру поверхности, форму и размер частиц — с использованием электронно-сканирующего микроскопа EVO-50XVP фирмы «Carl Zeiss» (Германия).

Содержания серы и углерода в модификациях углерода и порошках карбида вольфрама определяли с помощью анализатора серы и углерода CS 600 фирмы «LECO» (США).

Для создания твердосплавной смеси в качестве связки применяли ультрадисперсный порошок кобальта ПК-1у (ГОСТ 9721-79) с размером частиц 3–7 мкм и плотностью 8,93 г/см³. В качестве коммерческого продукта использовали твердосплавную смесь ВК8 производства Кировоградского завода твердых сплавов (СТО 00196144-0727-210 СМК).

Смешивание порошковых компонентов (80 г) в пропорциях, соответствующих химическому составу изготавливаемого твердого сплава, осуществляли в 75 %-ном растворе этилового спирта в планетарной шаровой мельнице РМ-400 (Германия). Отгонку спирта проводили с помощью универсального дистиллятора К-355 «BUCHI Labortechnik AG» (Швейцария) по стандартной методике в течение 35 мин.

В качестве пластификатора при холодном прессовании использовался синтетический каучук, растворенный в бензине АИ-95, в количестве 3 мас.%. Высушенные смеси измельчались в планетарной шаровой мельнице РМ-400 фарфоровыми шарами диаметром 16 мм в течение 140 мин и просеивались через сито с размером ячейки 0,25 мм. Прессование штабиков размером 8×8×4 мм выполнялось на прессе ЕРМ-500 GA (КНР) в стальной пресс-форме при давлении 1,3 т/см².

Для спекания твердосплавной композиции ВК8 применяли высокотемпературную вакуумную печь Nabertherm VHT 100/22-МО (Германия). Сам процесс осуществляли по 3 экспериментальным режимам:

I — предварительное спекание с противоточной подачей водорода при $t_{\text{сп}} = 930$ °С в течение 147 мин и выдержке $\tau = 60$ мин, затем окончательное спекание при $t_{\text{сп}} = 1410$ °С в вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ мбар в течение 85 мин;

II — спекание в вакууме при $t_{\text{сп}} = 1400$ °С и максимальном для данной печи вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мбар в течение 155 мин;

III — изостатическое горячее прессование в вакууме на лабораторном прессе горячего изостати-

ческого прессования фирмы «AIP» (США) при $t_{сп} = 1430\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1,3\text{ т/см}^2$ и $\tau = 5\text{ мин}$.

Плотность (ρ , г/см³) исследуемых образцов определяли методом гидростатического взвешивания на лабораторных весах AXIS AG 100 (ГОСТ 20018-74). Твердость (HV) сплавов оценивали по длине диагонали отпечатка при вдавливании алмазной пирамиды на приборе ТК-2М (Россия). Модуль упругости (модуль Юнга) определяли путем нахождения резонанса между собственными колебаниями образца и возбуждениями от генератора.

Оценку предела прочности при изгибе сплавов проводили по методике испытаний твердых сплавов ГОСТ 20019-74. При этом использовали образцы размером 5×5×35 мм, предварительно шлифованные до заданной ГОСТ 2789-73 шероховатости поверхности. Для получения достоверных значений в одной точке испытывались 5 образцов. Опыты осуществляли на универсальной испытательной машине EUS-20 (Германия) при трехточечном нагружении с расстоянием между опорами $30 \pm 0,5\text{ мм}$. Максимальная нагрузка составляла 10 кН (ГОСТ 28840-90). При испытании фиксировали разрушающую нагрузку с записью диаграммы «нагрузка (P) — перемещение по линии действия силы (F)». Скорость перемещения подвижной траверсы при этом составляла 3 мм/мин.

Прочность при сжатии образцов размером 4×4 мм и высотой $10 \pm 0,1\text{ мм}$ определяли на универсальной тестовой машине UTS-100 по ГОСТ 27034-86. Торцевые стороны после изготовления подвергались алмазной шлифовке для получения отклонения от перпендикулярности и параллельности не более 0,01 мм. Скорость перемещения активной траверсы при испытаниях выдерживалась в интервале 1,0—1,5 мм/мин.

Ударную вязкость (KC) находили по энергии излома образцов на маятниковом копре Zwick 5102. Сопротивление разрушению сплавов определяли с использованием силового критерия механики разрушения — коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic} , МПа·м^{1/2}). Согласно стандарту по оценке характеристик трещиностойкости при статическом нагружении для испытания материалов использовали образцы с концентратором напряжений в виде надреза с нанесенной в его вершине трещиной. Расчеты величины K_{Ic} для образцов типа штабиков при испытании на трехточечный изгиб выполняли по ГОСТ 25.506-85.

Микроструктуру твердого сплава исследовали на

электронном сканирующем микроскопе JSM 6510LA (JEOL, Япония).

В качестве режущего инструмента использовали сборные резцы с режущими четырехгранными пластинами из сплава ВК8. Испытания последних проводили на токарно-винторезном станке модели ИС1-1 (95ТС-1) путем продольного точения болванки диаметром 70 мм из жаропрочного сплава ХН70Ю без охлаждающих жидкостей. Режимы резания были следующие: скорость — варьируемая; подача — 0,3 мм/об; глубина резания — 0,7 мм. Критерием износа служило предельное значение фаски изнашивания задней поверхности резца из сплава ВК8, которое в зависимости от времени резания при черновом точении определяли на инструментальном микроскопе 45X Motic SMZ-168-TL (КНР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модификации углерода, сформированные пиролизом растительного сырья (отходов сельскохозяйственных культур) при температуре 950 °С, имеют аморфное строение, не идентифицируются с помощью РФА и представлены в виде спеков и грубодисперсных порошков (рис. 2, а). При $t_{пир} = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцы углерода представлены в виде легко разрушаемых порошковых агломератов (см. рис. 2, б) и имеют аморфно-кристаллическое строение. При температурах обработки 1300 и 1500 °С образуются порошки с дисперсностью менее 50 мкм (см. рис. 2, в, г), имеющие кристаллическое строение.

Продукт пиролиза сфагнового мха обладает индивидуальными особенностями морфологии (рис. 3). Аморфная модификация углерода имеет губчатое строение, наследуемое от исходного природного сырья, причем размер пор не превышает 200 нм, а толщина межпоровых перегородок составляет 40 нм.

Модификации углерода, сформированные в результате пиролиза растительного сырья, использовались в качестве углеродсодержащего компонента для проведения механохимического синтеза WC.

Для выявления сравнительных характеристик применяли сажу марки ПМ-15, рекомендуемую как оптимальный углеродсодержащий агент [3], а также активированный уголь и природный графит.

Как показали исследования, структура используемой модификации углерода из растительного сырья оказывает значительное влияние на время задержки (τ_z) МХС карбида вольфрама (рис. 4). Как видно, наличие кристаллической структуры способствует

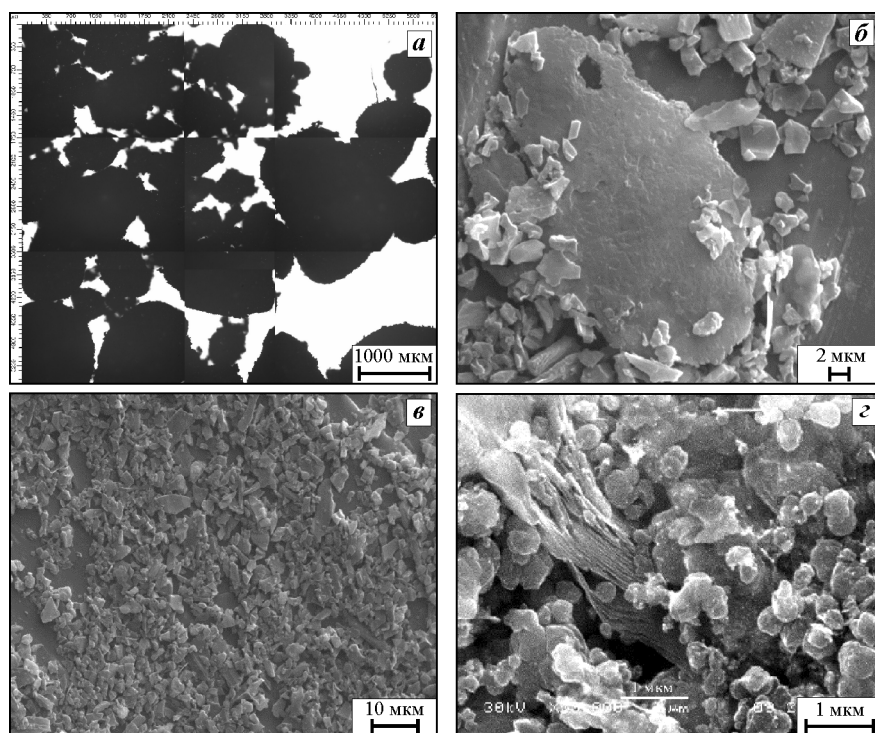


Рис. 2. Морфология продуктов пиролиза растительного сырья (шелуха овса)

$a - t_{\text{пир}} = 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $б - 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $в - 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $г - 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$

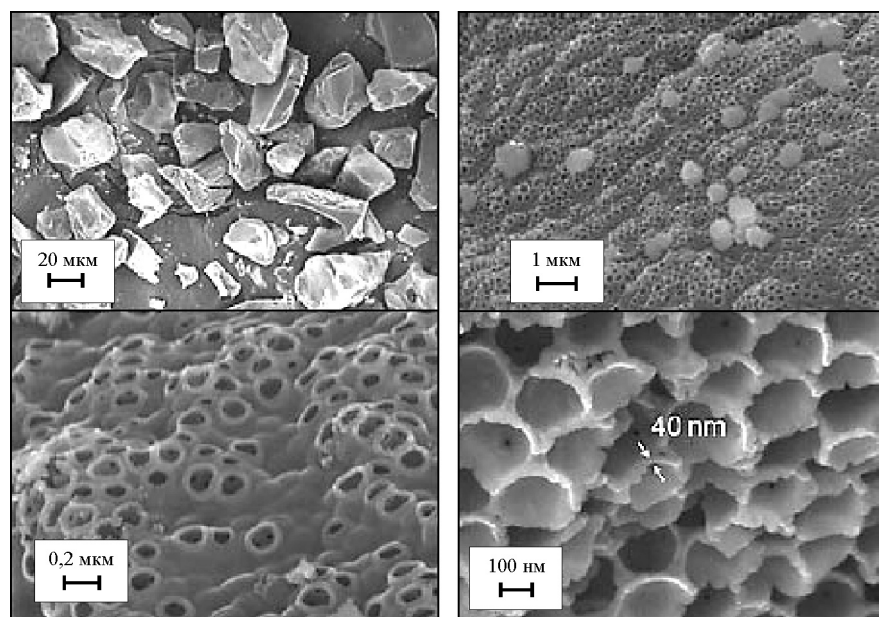


Рис. 3. Морфология продукта пиролиза мха бурого ($t_{\text{пир}} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

снижению на 40 % времени механоактивации исходных компонентов по сравнению с модификациями углерода, имеющими аморфную структуру.

Значительное влияние на τ_3 также оказывает степень ароматичности используемых углеродных компонентов (рис. 5). Как видно, чем она выше,

тем больше время задержки МХС карбида вольфрама, причем для модификаций углерода из растительного сырья зависимость менее выражена, чем для углерода, полученного из минеральных ресурсов или активированного угля.

Пиролитические модификации углерода из мха бурого и шелухи овса, обладая большей по сравнению с сажой степенью ароматичности, показывают сопоставимые с ней и даже лучшие результаты по времени реализации МХС.

На рис. 6 представлено влияние содержания углерода (продукт пиролиза мха бурого при $t_{\text{пир}} = 1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$) в исходной шихте на технологические параметры МХС карбида вольфрама. Видно, что его повышение приводит к увеличению времени задержки синтеза и теплового эффекта механохимической реакции. Максимальная температура процесса регистрируется при содержании углерода, равном 5,2 мас.%, что на 30 % превышает его расчетное значение. Дальнейший рост его количества в шихте приводит к стабилизации теплового эффекта механохимической реакции.

Как показали результаты рентгенофазового анализа, максимальное содержание WC в конечном продукте достигается при 6,4 мас.% C, что на 60 % превышает расчетное содержание углерода, необходимое для получения в конечном продукте 100 %-ного монокарбида вольфрама.

Также было установлено, что, независимо от вида используемого углеродного сырья, в результате проведения МХС с использованием системы $\text{WO}_3\text{—Mg—C}$ и последующей кислотной обработки порошкового материала конечный продукт всегда состоит из карбидной композиции WC + W_2C .

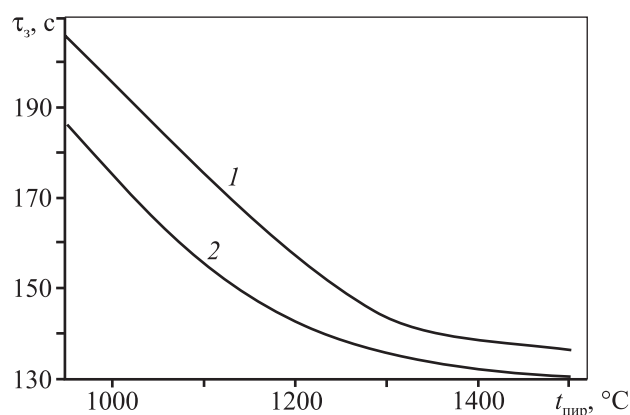


Рис. 4. Влияние температуры пиролиза растительного сырья на время задержки МХС карбида вольфрама
1 — шелуха овса, 2 — мох бурый

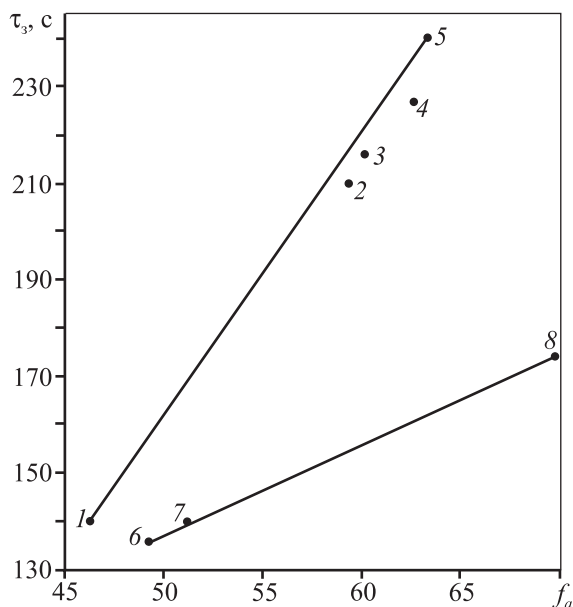


Рис. 5. Влияние степени ароматичности углеродных агентов на время задержки МХС карбида вольфрама
1 — сажа ПМ-15; 2, 4 и 5 — активированный уголь; 3 — природный графит; 6 — мох бурый; 7 — шелуха овса, 8 — шелуха пшеницы.
Температура пиролиза растительного сырья составляла 1300 °C

Наиболее высокое содержание WC наблюдается при проведении МХС с участием модификаций углерода, полученных из растительного сырья при $t_{\text{пир}} = 950$ °C.

В табл. 1 представлен фазовый состав продуктов механохимического синтеза после кислотной обработки, а также содержания углерода и серы в композиции WC + W₂C. Как видно, количества S и C_{своб} в порошках, полученных с помощью модификаций углерода из растительного сырья, в 3,0 и 1,5 раза соответственно меньше, чем при использовании традиционного углеродного агента — сажи.

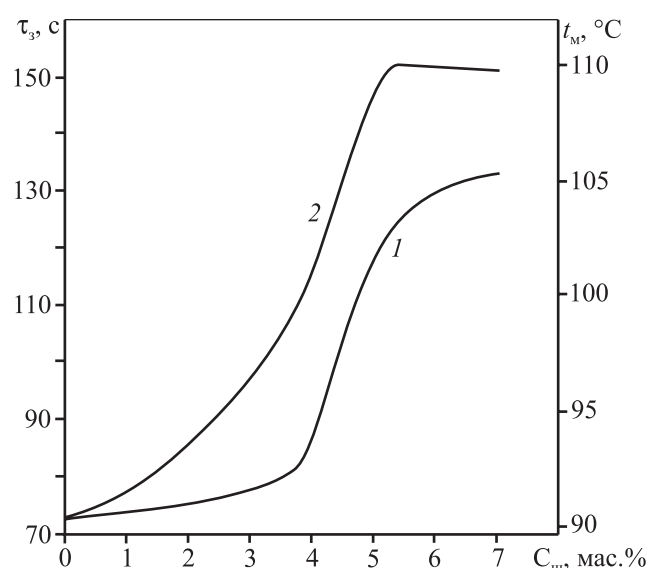


Рис. 6. Влияние содержания углерода в исходной шихте на: время задержки синтеза (1) и температуру стенок механореактора в момент реализации МХС (2)

Таблица 1
Химический и фазовый составы композиции WC + W₂C, полученной путем МХС с использованием различных углеродных агентов

Углеродный агент	Содержание, мас.%			Фазовый состав, мас.%	
	C _{общ}	C _{своб}	S	WC	W ₂ C
Мох бурый*	5,62	0,12	0,0062	78,92	20,95
Шелуха овса*	5,56	0,10	0,0070	77,55	22,35
Активированный уголь	5,57	0,16	0,0086	76,09	23,74
Сажа ПМ-15	5,56	0,15	0,023	75,91	23,93
Графит	5,43	0,13	0,025	72,36	27,51

* Температура пиролиза растительного сырья — 950 °C.

На рис. 7 представлена морфология композиции WC + W₂C, синтезированной с использованием различных углеродных агентов, после кислотной обработки. Как видно, наибольшей дисперсностью обладает порошок, синтезированный с применением углерода с аморфным строением, полученного пиролизом мха бурого при температуре 950 °C. Результаты исследований, проведенных на лазерном анализаторе, показали, что размер частиц карбидной фазы составляет 4—20 мкм (рис. 8).

Дополнительное введение в исходную шихту для МХС карбида вольфрама механически деструктируемого полимера — полиметилметакрилата (ПММА) — в количестве 3 мас.% позволило получить после

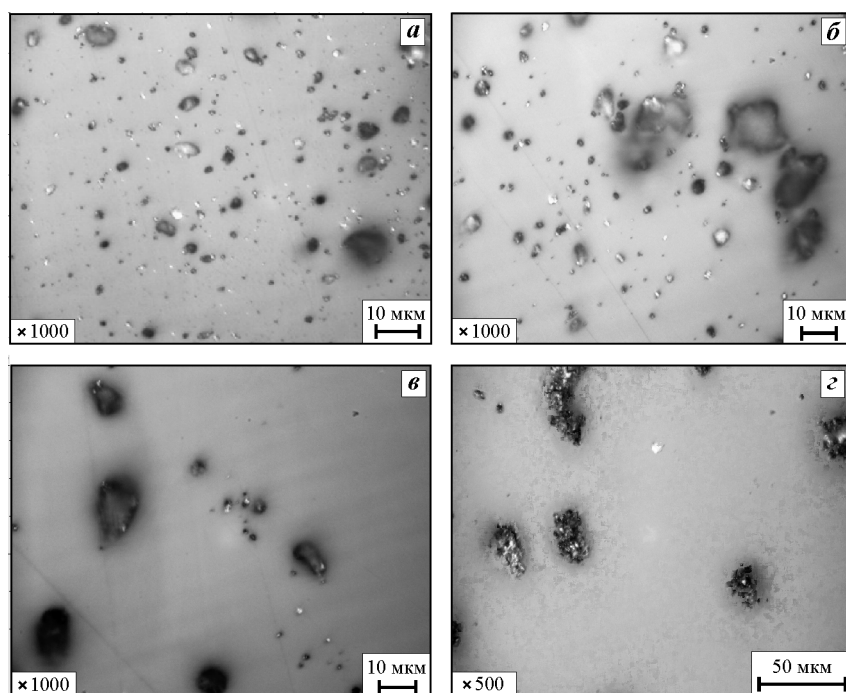


Рис. 7. Морфология порошка композиции WC + W₂C

МХС с использованием углеродного агента: а – мох бурый ($t_{\text{пир}} = 950^\circ\text{C}$); б – активированный уголь; в – графит; г – сажа ПМ-15

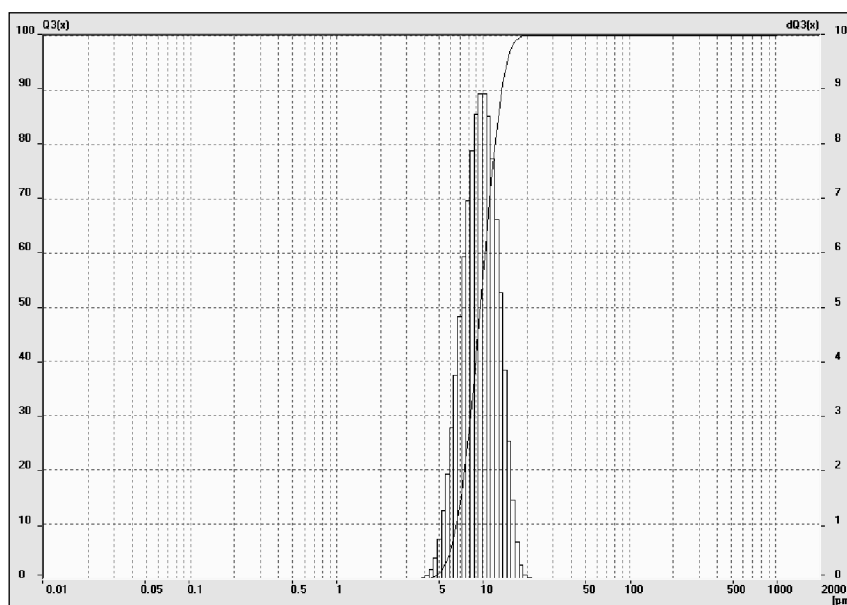


Рис. 8. Гистограмма порошка карбидной композиции, синтезированной с использованием в качестве углеродного агента мха бурого ($t_{\text{пир}} = 950^\circ\text{C}$)

синтеза и кислотной отмывки продукт, содержащий только WC [7]. Выбор ПММА был обусловлен тем, что он легко подвергается механодеструкции [8], а при его термодеструкции в процессе механохимической обработки образуется значительное количество углеводородных соединений, способ-

ствующих процессу карбидизации вольфрама из газовой фазы [3, 9]. В случае использования в качестве углеродного агента природного графита получить конечный продукт, содержащий только фазу WC, за счет дополнительной подшихтовки ПММА не представилось возможным (минимальное содержание W₂C в порошке составило 12 мас.%).

Из карбидной композиции, полученной путем МХС с использованием углеродного агента из мха бурого (см. табл. 1), была приготовлена экспериментальная твердосплавная смесь ВК8. Как видно из результатов, представленных в табл. 2, твердые сплавы, полученные из экспериментальных смесей, обладают более высокими физико-механическими характеристиками, чем спеченные из коммерческих продуктов. Причем, если разница в свойствах образцов, полученных по смешанному режиму спекания, не превышает 3–5 %, то для сплавов, изготовленных спеканием в вакууме и изостатическим горячим прессованием, она более значительна — от 15 до 20 %.

Сравнительные испытания режущих пластин из твердого сплава ВК8 показали, что стойкость при резании у экспериментальных пластин, изготовленных методом изостатического горячего прессования, в зависимости от скорости резания, в 5–19 раз выше, чем у промышленных резцов (табл. 3).

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что основными лимитирующими факторами при проведении механохимического синтеза карбида вольфрама являются структура модификаций углерода и их степень ароматичности.

2. Максимальное содержание монокарбида вольфрама в синтезируемом продукте образуется при проведении синтеза с участием аморфной модифи-

Таблица 2

Физико-механические и структурные характеристики твердого сплава ВК8 после спекания в различных атмосферах (числитель-экспериментальная смесь / знаменатель – коммерческий продукт)

Метод спекания	WC, об. %	\bar{d}_{WC}^* , мкм	\bar{l}_{Co}^{**} , мкм	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	HV, ГПа	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$\sigma_{изг}$, ГПа	$\sigma_{сж}$, ГПа	KC, кДж/м ²	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
В водороде с противотоком + вакуум (смешанный режим)	$84 \pm 1,7$	$2,22 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,04$	$14,5 \pm 0,4$	$13,7 \pm 0,7$	61 ± 1	$2,24 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,2$	35 ± 2	$11 \pm 0,5$
	83,9	$2,41 \pm 0,03$	$0,77 \pm 0,04$	$14,6 \pm 0,4$	$11,2 \pm 0,7$	60 ± 1	$2,12 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,2$	34 ± 2	$10 \pm 0,5$
В вакууме	$85 \pm 1,2$	$2,1 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,04$	$14,6 \pm 0,4$	$14,4 \pm 0,7$	$61,5 \pm 1$	$2,64 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$	62 ± 2	$14 \pm 0,5$
	$83,1 \pm 1,2$	$2,17 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,04$	$14,7 \pm 0,4$	$12,3 \pm 0,7$	$60,5 \pm 1$	$2,37 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,2$	51 ± 2	$12 \pm 0,5$
Изостатическое горячее прессование в вакууме	$89 \pm 1,1$	$1,7 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,03$	$14,9 \pm 0,4$	$18,3 \pm 0,7$	$63,0 \pm 1$	$2,97 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,2$	95 ± 2	$17 \pm 0,5$
	$86,3 \pm 1,1$	$1,9 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,03$	$15,0 \pm 0,4$	$15,4 \pm 0,7$	$61,5 \pm 1$	$2,74 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$	77 ± 2	$14 \pm 0,5$
* Средний условный размер частицы карбида вольфрама.										
** Средняя условная толщина прослойки кобальта.										

Таблица 3

Стойкость (мин) пластин из твердого сплава ВК8

Твердый сплав	Скорость резания, м/мин						
	20	25	30	35	40	100	150
Промышленный	27	15	11	5	2,3	0,7	0,55
Экспериментальный	135	115	85	69	43	6,9	5,7

кации углерода, полученной из мха бурого при температуре пиролиза 950 °С.

3. Карбид вольфрама, синтезированный с использованием модификаций углерода из растительного сырья, обладает приемлемым химическим составом для дальнейшего использования в технологии порошковой металлургии.

4. Спеченный твердый сплав ВК8, изготовленный с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии, обладает высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.И. Карбиды вольфрама. Киев: Наук. думка, 1974.
2. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1986.
3. Попович А.А. Механохимический синтез тугоплавких соединений: Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003.
4. Попович А.А., Рева В.П., Василенко В.Н. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1992. № 5. С. 6—9.
5. Онищенко Д.В., Попович А.А., Ван Син Шен // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2011. № 2. С. 9—15.
6. Онищенко Д.В., Чаков В.В. // Журн. прикл. химии. 2011. Т. 84, № 9. С. 1562—1566.
7. Онищенко Д.В., Рева В.П. // Физика и химия обраб. материалов. 2011. № 2. С. 71—77.
8. Гороховский Г.А., Чернышев В.Г., Рева В.П. и др. // Порошк. металлургия. 1988. № 12. С. 1—8.
9. Попович А.А., Рева В.П., Василенко В.Н. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1992. № 5. С. 6—9.