

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ**

---

*УДК 621.762*

**К.Е. БЕЛЯВИН, докт. техн. наук (БНТУ),  
Д.В. МИНЬКО, канд. техн. наук,  
С.В. ПОБЕРЕЖНЫЙ, канд. техн. наук,  
Н.В. РЕШЕТНИКОВ (ИПМ НАН Беларуси)**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СПЕЧЕННОМ ТВЕРДОМ СПЛАВЕ МАРКИ ВК8**

На сегодняшний день одним из лучших инструментальных материалов являются твердые сплавы. Эффективность применения твердых сплавов обусловлена удачным сочетанием высоких уровней твердости, износостойкости с одной стороны, прочности при изгибе и ударной вязкости – с другой. Определенные достижения в улучшении качества твердых сплавов получены благодаря снижению остаточной пористости, повышению прочности связки, а также использованию разнообразных способов физического воздействия.

На эксплуатационные характеристики твердых сплавов на основе монокарбида вольфрама (WC) в первую очередь оказывают влияние такие факторы, как состав исходной порошковой твердосплавной смеси, и ее качество, качество формования смеси, технологическая схема и технологические режимы спекания, используемый пластификатор и защитная атмосфера, применяемое оборудование и технологическая оснастка. Изменяя тот или иной фактор на стадии техпроцесса, можно управлять эксплуатационными характеристиками изготавливаемого твердосплавного материала.

Зависимость физико-механических свойств твердых сплавов от фазового состава, структуры и, в частности, от свойств структурных составляющих, обусловили разработку и внедрение в практику производства новых методов повышения эксплуатационных характеристик твердосплавных изделий в спеченном состоянии. Ограни-

ченная растворимость карбида вольфрама в кобальте [1, 2], состав и свойства связующей фазы, которые в значительной степени определяют прочностные и деформационные характеристики твердых сплавов, а также существование различных химических соединений системы W-C-Co [2], указывают на возможность изменения параметров структуры двумя способами: либо регулированием скорости охлаждения после спекания либо дополнительной термической обработкой.

Существующие методы термообработки условно разделены на три группы [3, 4]:

а) отжиг (или отпуск) при  $T = 600-1250$  °С с длительностью выдержки от 1 до 120 ч;

б) закалка твердосплавных изделий, охлажденных после спекания от  $T = 300-1200$  °С до комнатной температуры в различных средах;

в) закалка от температуры спекания в различных средах.

Для эффективного проведения процесса термообработки необходимо установить оптимальные скорости нагрева и охлаждения твердых сплавов при закалке (применение закалочных сред с различной скоростью охлаждения).

Используя оптимальный режим термообработки (нагрев в соляной ванне до температур выше 1200 °С со скоростью нагрева 10-16 °С/с и скоростью охлаждения 1,5-2 °С/с), достигают максимального повышения механических свойств и эксплуатационных характеристик твердых сплавов. Предел прочности на изгиб повышается на 5-15%, ударная вязкость – 15-30%, твердость – 2-4%, вязкость разрушения – 5-20%, долговечность – в 2-6 раз; абразивная износостойкость – на 50-70% [1, 5-7].

Изменение механических свойств и эксплуатационных характеристик твердых сплавов после закалки, по-видимому, связано с изменением состава связующей фазы и ее напряженного состояния. Установлено, что после закалки в связке дополнительно растворяется 1-2,5% W [1], а также происходит закономерное, хотя и не очень значительное, уменьшение условной величины блоков мозаики в зернах WC и рост микроискажений решетки. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают изменение внутризеренной структуры WC [8].

Для повышения эффективности технологических процессов, связанных с получением порошковых твердых сплавов, в последние

годы начали применяться электроимпульсные методы обработки, обеспечивающие быстрое протекание металлургических процессов на границе контактных зон порошковых частиц [9].

В качестве нового метода обработки электроимпульсный метод начали использовать с конца 60-х годов прошлого века [10]. Основная часть работ, посвященная влиянию токов высокой плотности (более  $10^8$  А/м<sup>2</sup>) на структуру и свойства обрабатываемых объектов, выполнена на чистых металлах. Практический интерес представляет в первую очередь наложение электрического тока на зону деформации в процессах волочения или прокатки малопластичных металлических материалов. Взаимодействие электрического тока с деформируемым металлом еще мало изучено. Установлено, что резко снижается сопротивление металла деформированию и повышается его пластичность под влиянием токов высокой плотности. Условно это явление названо электронно-пластическим эффектом [11]. Воздействуя на электронную систему металла электрическим током большой плотности, можно получать необходимые структуру и физико-механические свойства обрабатываемых материалов.

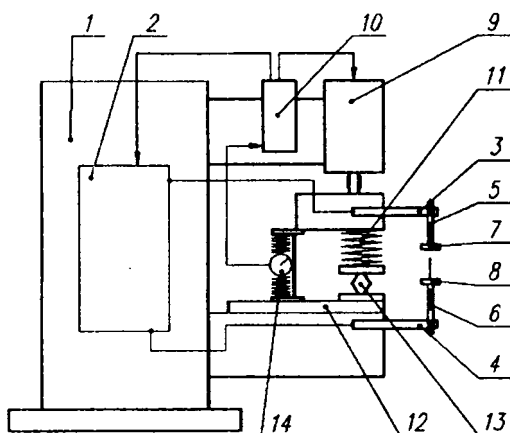
Представляют интерес исследования, связанные с изучением воздействия на находящуюся в замкнутом объеме при повышенном давлении (до 100 МПа) шихту токов повышенной плотности (100-3000 А/см<sup>2</sup>), действующих на протяжении некоторого времени (от нескольких секунд до нескольких минут) [12]. При этом возможно пропускание электрического тока не только через порошок, но и частично через пресс-инструмент (чаще графитовый). Методы электроимпульсного воздействия на твердосплавную шихту позволяют обеспечить высокую скорость протекания металлургических высокотемпературных процессов на границе раздела карбид - связующая фаза, что позволяет получать твердые сплавы с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик.

Дополнительную термообработку с помощью электроимпульсного воздействия на твердосплавную заготовку целесообразно проводить либо после отжига пластификатора, либо после окончательного спекания. В первом случае структурные изменения проводят на стадии изготовления твердосплавного материала, оказывая влияние на ход процесса окончательного спекания и получения заданных свойств твердого сплава. Во втором случае электроимпульсная

обработка оказывает воздействие на готовый твердосплавный материал путем изменения условий нагрева – охлаждения.

Целью работы явилось исследование возможности повышения эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента на основе карбида вольфрама путем его дополнительной электроимпульсной обработки.

Для осуществления процесса электроимпульсной обработки в качестве технологического оборудования использовали модернизированную машину контактной сварки МТ2201 (рис. 1) с регулятором контактной сварки РКС-801, технические характеристики которой указаны в таблице 1.



- 1 – корпус; 2 – источник тока; 3 – консоль верхняя;  
4 – консоль нижняя; 5 – электрододержатель верхний;  
6 – электрододержатель нижний; 7 – электрод верхний;  
8 – электрод нижний; 9 – привод для передачи усилия  
и перемещения на консоли; 10 – аппаратура управления  
и контроля технологических параметров источника тока;  
11 – упругий элемент; 12 – диэлектрическая прокладка;  
13 – домкрат; 14 – датчик перемещения

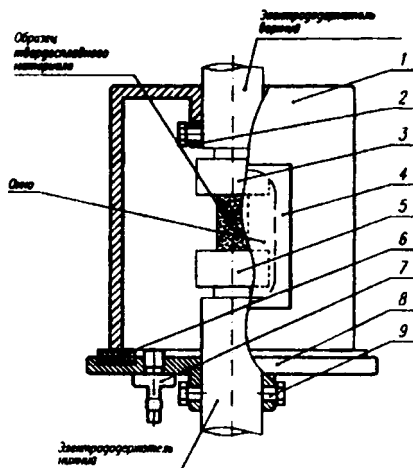
Рисунок 1 – Принципиальная схема технологического оборудования

Таблица 1 – Основные технические характеристики технологического оборудования

Наименование характеристики	Значение
Номинальное напряжение питающей сети однофазного переменного тока, В	380
Номинальная частота, Гц	50
Наибольший вторичный ток, кА	22
Количество ступеней регулирования вторичного напряжения сварочного трансформатора	8
Вторичное напряжение холостого хода, В (при $U = 325$ В)	2,2...4,425 (в зависимости от ступени трансформации)
Привод рабочего усилия	пневматический
Номинальное давление сжатого воздуха, МПа	0,63
Усилие сжатия на электродах машины:  номинальное при давлении сжатого воздуха 0,48 МПа, даН наименьшее при давлении сжатого воздуха 0,05 МПа, даН наибольшее при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа, даН	  630  95 ± 15 %  800 ± 15 %
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВА, не более	150
Мощность при ПВ 50 %, кВА, не менее	40
Номинальная потребляемая мощность, кВА, не более	60

Для проведения исследований методом прессования и последующего печного спекания порошковой шихты были получены экспериментальные образцы твёрдосплавного материала в форме цилиндра диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Компонентный состав порошковой шихты соответствовал составу, используемому для производства твёрдого сплава ВК8.

Для электроимпульсной обработки экспериментальных образцов в защитной атмосфере аргона использовали технологическую камеру (рис. 2).



- 1 – корпус; 2 – кольцо; 3 – электрод верхний; 4 – заглушка;  
 5 – электрод нижний; 6 – уплотнительное кольцо;  
 7 – штуцер; 8 – диск; 9 – болт

Рисунок 2 – Технологическая камера

Исследования микроструктуры экспериментальных образцов до и после электроразрядной обработки проводили на металлографическом микроскопе «Поливар» (фирма "Райхерт", Австрия). Структурные характеристики материала исследовали на программно-аппаратном комплексе обработки и анализа изображений AutoSCAN. Рентгенофазовый анализ экспериментальных образцов проводили с помощью дифрактометра общего назначения «Дрон 3». Испытания экспериментальных образцов на износостойкость осуществляли на машине трения МТ-2.

Спекание при изготовлении твердых сплавов относится к процессам, при которых в спекаемом материале образуется некоторое количество жидкой фазы. Присутствие жидкой фазы в спекаемой системе приводит к возникновению дополнительных явлений по сравнению со спеканием в твердой фазе, например, смачивание твердой составляющей жидкой фазой, частичное растворение твердых компонентов в жидкости с последующей кристаллизацией твердых фаз из образующихся растворов и др.

Уплотнение при спекании осуществляется в три стадии: первая обусловлена течением жидкости и перегруппировкой зерен твердой фазы в направлении более плотной их упаковки, вторая включает растворение мелких зерен и кристаллизацию материала на более крупных зернах (перекристаллизация через жидкую фазу), в третьей возможно дополнительное уплотнение вследствие срастания зерен между собой, которое должно подчиняться закономерностям спекания в твердой фазе.

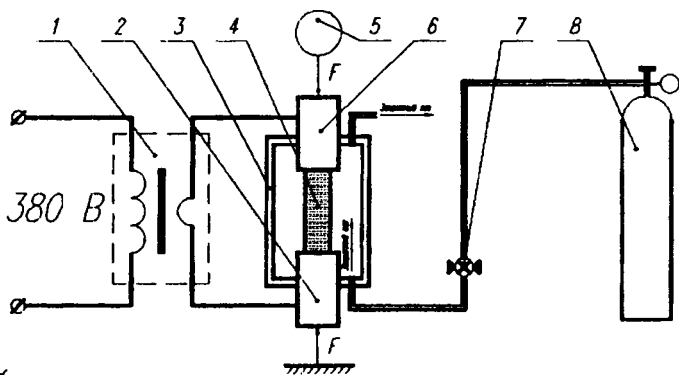
Влияние смачиваемости на формирование спеченного тела и рост зерен при спекании имеют особо важное значение для систем, в которых не происходит растворения твердой фазы в жидкой, и, таким образом, исключается возможность роста зерен вследствие перекристаллизации через жидкую фазу. В этом случае рост зерен может происходить только путем срастания, и степень разделения их, в соответствии со степенью смачиваемости, образующейся при спекании жидкой фазой, будет играть существенную роль, т. е. при смачивании рост зерен должен затрудняться.

Система WC-Co является примером систем, в которых сплав формируется в результате спекания в присутствии жидкой фазы, образующейся на основе легкоплавкого компонента (кобальта). Жидкая фаза по перитектической реакции с  $W_2C$  образует двойной карбид вольфрама и кобальта, так называемая фаза  $\eta$  является неустойчивым соединением, образующимся при быстром охлаждении и разлагающимся при нагревании [2].

Исследования показывают, что присутствие фазы  $\eta$  в промышленных твердых сплавах приводит к их повышенной хрупкости, при этом повышается их твердость. Так, прочность на изгиб сплава с 8% Co, содержащего фазу  $\eta$ , по сравнению с двухфазным сплавом снижается почти в два раза [2].

Электроимпульсная обработка спеченного твердого сплава не приводит к перекристаллизации карбида вольфрама через жидкую фазу (кобальт), однако должна вызывать разложение фазы  $\eta$ , особенно в присутствии дополнительного углерода.

Результатом проведенного анализа применяемых методов дополнительной термообработки твердых сплавов стала разработка технологической схемы процесса электроимпульсной обработки (рис. 3).



1 – трансформатор; 2 – электрод нижний; 3 – камера; 4 – экспериментальный образец; 5 – устройство нагружения; 6 – электрод верхний; 7 – редуктор; 8 – баллон с аргоном

Рисунок 3 – Схема процесса электроимпульсной обработки

Процесс электроимпульсной обработки экспериментальных образцов осуществляли следующим образом. В камере 3 между графитовыми электродами 2 и 6 устанавливали образец 4. Камеру 3 закрывали и в ее внутреннее пространство из баллона 8 через редуктор 7 подавали аргон. Величину усилия сжатия электродов  $F$  регулировали с помощью устройства нагружения 5, температуру и длительность обработки – РКС с помощью трансформатора 1.

В результате проведенных экспериментов установлен оптимальный диапазон технологических режимов электроимпульсной обработки образцов твердого сплава, при которой сохраняются их геометрическая форма и размеры: давление сжатия электродов – 10-20 МПа, плотность тока  $\sim 10^8$  А/м<sup>2</sup>, количество импульсов – 1-10, длительность обработки – 10-10<sup>2</sup> с.

Анализ полученных микроструктур показал, что в процессе электроимпульсной обработки экспериментальных образцов твердого сплава марки ВК8 происходит некоторое количественное увеличение фазы WC (белые зерна) и уменьшение η-фазы (темные границы зерен). При этом размер зерен фазы WC до и после электроимпульсной обработки практически не меняется и составляет 1,5-3,0 мкм (рис 4).





Таблица 2 – Количественные результаты рентгенофазового анализа

Фаза	WC	W <sub>2</sub> C	Co <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C
Условная концентрация фазы в материале образцов до электроимпульсной обработки, %	40-45	14-16	38-40
Условная концентрация фазы в материале образцов после электроимпульсной обработки, %	84-86	3-4	9-11

Результаты исследований фазового состава твердосплавных образцов до и после электроимпульсной обработки позволили сделать вывод, что электроимпульсная обработка позволяет уменьшить количество η-фазы за счет ее разложения с переходом в двухфазную систему WC-Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C. Результаты количественного рентгенофазового анализа показывают, что доля хрупкой фазы после электроимпульсной обработки уменьшилась примерно в 4 раза.

С целью определения влияния изменений структурно-фазового состава на эксплуатационные характеристики твердосплавного материала проведены испытания на износостойкость рабочих элементов шарошечных долот, полученных из порошковой композиции ВК8 с использованием дополнительной электроимпульсной обработки. Рабочие элементы под нагрузкой перемещали по вращающемуся стальному или чугунному диску от центра к краю. В результате этого образец совершал по спирали путь определенной длины. На испытуемом образце возникали полосы износа, по которым определяли его степень. В результате испытаний на износостойкость установлено, что дополнительная электроимпульсная обработка рабочих элементов шарошечных долот из спеченного твердого сплава марки ВК8 позволяет повысить их износостойкость на 10-13 %.

### Литература

1. Лошак, М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М. Г. Лошак. – Киев: Наукова думка, 1984. – 84 с.

**2. Третьяков, В. И.** Основы металловедения и технология производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 283 с.

**3. Jonsson, H.** Composition and Microstructure of Binder Phases of Slowly Cooled WC-Co Cemented Carbides / H. Jonsson // Planseeber. Pulvermet. – 1973, 23. – P. – 187-208.

**4. Муха, И. М.** Влияние скорости охлаждения на качество твердых сплавов / И. М. Муха // Порошковая металлургия. – 1971. – № 5.

**5. Лошак, М. Г.** Упрочнение твердых сплавов / М. Г. Лошак, Л. И. Александрова. – Киев: Наукова думка, 1977. – 147 с.

**6. Туманов, В. И.** Свойства сплавов системы карбид вольфрама-кобальт / В. И. Туманов. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.

**7. Теплопроводность** и износ твердосплавных режущих элементов после термической обработки / М. Е. Дудкин [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 33–38.

**8. О влиянии** термической обработки на прочность твердого сплава ВК15 / М. Г. Лошак [и др.] // Горный породоразрушающий инструмент. – Киев: Техніка, 1970. – С. 64–72.

**9. Иванов, С. А.** Физико-механические и функциональные свойства композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом интенсивного электроспекания / С. А. Иванов, В. П. Переяслов, А. Л. Майстренко // Современное материаловедение: достижения и проблемы MMS: сб. материалов Междунар. конф. – 26-30 сент., 2006. – С. 401–402.

**10. Троицкий, О. А.** Эффект электропластичности / О. А. Троицкий // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – №1. – С. 18–20.

**11. Болгов, И. С.** Получение прецизионной плющенной ленты из вольфрама / И. С. Болгов, В. Д. Мутовин, В. И. Нефедов // Электронная промышленность. – 1980. – №10. – С. 49–51.

**12. Майстренко, А. Л.** Интенсивное электроспекание алмазосодержащих композиционных материалов / А. Л. Майстренко [и др.] // Сверхтвердые материалы. – 2000. – №5 – С. 39-45.