

УДК 621.762:621.79:536.2

ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРУКТУР

*Д. В. МИНЬКО, канд. техн. наук, доцент,
К. Е. БЕЛЯВИН, доктор техн. наук, профессор,
В. К. ШЕЛЕГ, чл.-корр. НАН Беларуси, доктор техн. наук, профессор*

Белорусский национальный технический университет
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65
dz-m@tut.by

Аннотация: Рассмотрены наиболее эффективные методы повышения прочности конструкционных материалов при сохранении их пластичности. Показано, что задача повышения прочности изделий путем создания объемной или поверхностной ультра- и нанокристаллической структуры материала в промышленных масштабах до сих пор до конца не решена. Решение этой задачи может основываться на использовании электрофизических методов высокоэнергетического воздействия, получивших в последние годы широкое развитие. Рассмотрены перспективные импульсные электрофизические методы – электроимпульсное спекание и импульсно-плазменное модифицирование, описаны их принципы и области наиболее эффективного применения. Представлены экспериментальные данные и примеры использования полученных композиционных материалов и модифицированных структур.

Ключевые слова: композиционный материал, высоковольтный разряд, плазма, модифицированная структура

Введение

Композиционные материалы (КМ), имеющие неоднородную структуру и состоящие, главным образом, из физически и химически разнородных веществ, создаваемые с целью достижения свойств, недоступных для однородных материалов, получают все большее распространение в технике. Расширение работ по созданию КМ с улучшенными функциональными свойствами, к которым можно отнести также элементы деталей с модифицированной структурой, привело к разработке новых уникальных технологий. В основу большинства таких технологий положены методы, реализуемые на основе использования энергии электрического тока или специфических физических явлений, создаваемых электрической энергией [1, 2].

Наиболее эффективным методом повышения прочности конструкционных материалов считается создание в объеме или на поверхности материала ультрамелкого зерна с развитой ячеистой субструктурой. Высокодисперсное состояние в реальных изделиях достигается применением наследственно мелкозернистых сталей, различными методами интенсивной пластической деформации [3-5], лазерной либо ионно-плазменной обработкой [6]. При этом задача повышения прочности изделий путем создания объемной или поверхностной ультра- и нанокристаллической структуры в промышленных масштабах окончательно не решена. Решение этой задачи может основываться на использова-

нии электрофизических методов высокоэнергетического воздействия, получивших в последние годы значительное развитие.

Методика экспериментального исследования

Метод электроимпульсного спекания (ЭИС) [7] основан на пропускании через находящийся в диэлектрической матрице 7 порошок 6 (рисунок 1), содержащий электропроводящие компоненты, мощного (10^5 - 10^6 кА/м²) кратковременного (10^{-5} - 10^{-2} с) импульса тока, создаваемого емкостным генератором 3. Ток подводится через электроды-пуансоны 8 и 9. При этом происходит локальный разогрев и соединение частиц порошка в зоне их контакта. Высокая скорость нагрева-охлаждения при ЭИС (до 10^8 К/с) способствует возникновению и сохранению микрокристаллических и аморфизированных структур в объеме материала [8].

Метод импульсно-плазменного модифицирования (ИПМ), разработан для поверхностной обработки материалов и покрытий с различной геометрией поверхности с целью управления структурой, фазовым составом, физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Принцип ИПМ заключается в ускорении потока стационарной плазмы с помощью импульсных высоковольтных (10^3 - 10^4 В) разрядов с регулируемой частотой следования (0,1-10 Гц) до сверхзвуковых скоростей (рисунок 2). В формирующихся таким образом импульсных плазменных пучках плотность тока достигает

значений порядка 10^3-10^4 кА/м², а локальная температура плазмы может достигать значений

$\sim 10^4$ К [2]

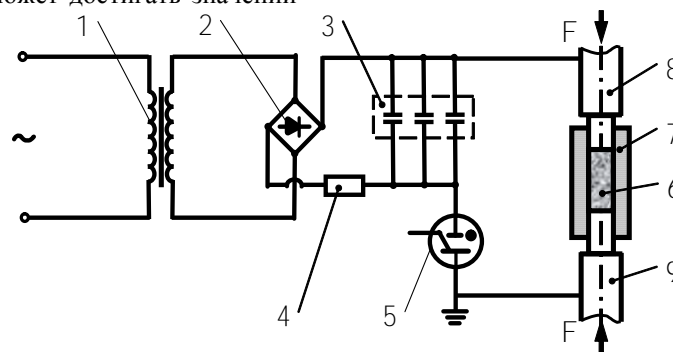


Рисунок 1 – Схема установки ЭИС: 1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – емкостные накопители энергии; 4 – ограничивающий резистор; 5 – игнитронный разрядник; 6 – порошок; 7 – диэлектрическая матрица; 8 – верхний электрод-пуансон; 9 – нижний электрод-пуансон; F – усилие прессования

Микроструктуру экспериментальных образцов исследовали на металлографическом микроскопе Polivar (Австрия) и электронном сканирующем микроскопе MIRA (Чехия), микротвердость – с помощью микротвердомера Micromet

(Германия), рентгенофазовый анализ проводили с помощью дифрактометра общего назначения «Дрон 3», испытания на износостойкость – на машине трения МТ-2.

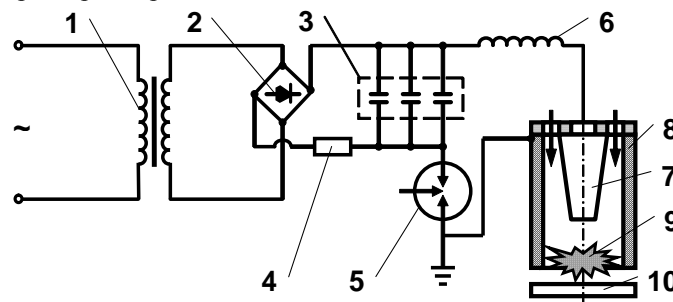


Рисунок 2 – Схема установки ИПМ: 1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – емкостный накопитель энергии; 4 – ограничивающий резистор; 5 – разрядник; 6 – катушка индуктивности; 7 – катод; 8 – анод; 9 – плазменный пучок; 10 – обрабатываемое изделие

Результаты и обсуждение

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 так называемую η -фазу, которая является неустойчивым соединением, образующимся при быстром охлаждении и разлагающимся при нагревании. Присутствие η -фазы в промышленных твердых сплавах приводит к значительному снижению прочности на изгиб (по сравнению с двухфазным сплавом – почти в два раза) [9].

Проведенные исследования показали, что при ЭИС твердого сплава не происходит перекристаллизации карбида вольфрама через жидкую фазу (кобальт), однако наблюдается разложение η -фазы, особенно в присутствии дополнительного углерода.

Анализ полученных микроструктур позволил установить, что в процессе ЭИС экспери-

ментальных образцов твердого сплава марки ВК8 происходит некоторое количественное увеличение фазы WC и уменьшение η -фазы. При этом размер зерен фазы WC до и после ЭИС практически не меняется и составляет 1,5-3,0 мкм.

Результаты рентгенофазового анализа экспериментальных образцов до и после ЭИС (рисунок 3) подтвердили, что электроимпульсная обработка позволяет уменьшить количество η -фазы за счет ее разложения с переходом в двухфазную систему WC-Co₃W₃C. Результаты количественного рентгенофазового анализа показывают, что доля хрупкой η -фазы после ЭИС уменьшилась примерно в четыре раза.

Результаты испытания на износостойкость КМ, полученных из порошковой композиции ВК8 нанесенной на стальную подложку с использованием ЭИС, показали, что применение ЭИС позволяет повысить износостойкость на 10-13 %.

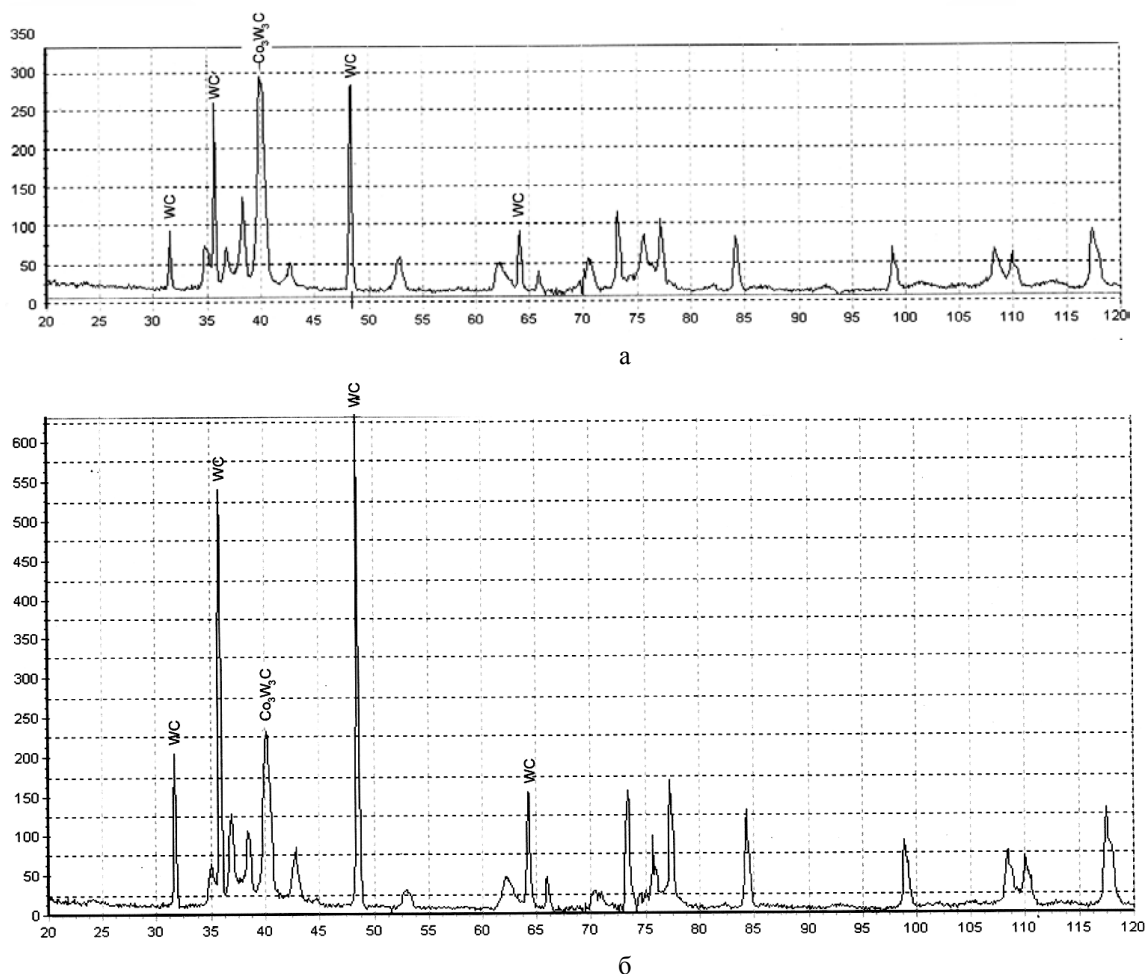


Рисунок 3 – Результаты рентгенофазового анализа экспериментальных образцов ВК8 до (а) и после ЭИС (б)

На основе метода ЭИС разработана технология получения износостойких порошковых покрытий на внутренних поверхностях стальных втулок. При этом возможно нанесение слоев переменной толщины с высокой точностью и чистой поверхности. Область применения

таких КМ – различные конструкции форсунок и распылителей газов, пара, жидкостей (рисунок 4). Композиционные втулки используются также для правки проволоки в металлообработке. Технология применяется для изготовления, восстановления и упрочнения деталей.



Рисунок 4 – Сменные износостойкие форсунки для подачи технической воды под высоким давлением

Экспериментальные исследования метода ИПМ проводили на образцах из стали 45 предварительно термообработанных до 44-46 HRC и подвергнутых полированию до Ra0,4. Исследования показали, что после ИПМ поверхность

образцов приобретала темно-серый оттенок, но параметр шероховатости не изменялся.

Результаты измерений микротвердости образцов в перпендикулярном направлении показали (рисунок 5), что после

ИПМ микротвердость в тонком (~20 мкм) поверхностном слое возрастала в 2-3 раза (до 6-7 ГПа) и по мере удаления от поверхности моно-

тонно снижалась до 1,7-1,8 ГПа на глубине 100 мкм от поверхности.

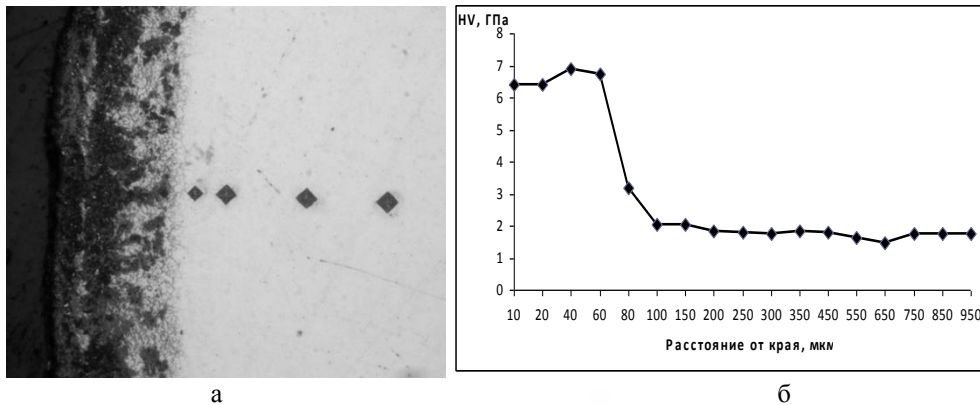


Рисунок 5 – Изменение (а, x50) и распределение (б) микротвердости в направлении от поверхности к центру поперечного сечения образца после ИПМ

Результаты металлографических исследований образцов из стали 45, полученные с использованием методик оптической и электронной микроскопии, показывают, что после ИПМ в тонких поверхностных слоях материала возникают мартенситные превращения, увеличивающие микротвердость в 2-3 раза на глубину до 20 мкм, в то время как микротвердость внутренней части материала остается практически неизменной.

Особенностью ИПМ является также то, что обработке можно подвергать предварительно объемно-закаленные детали со сложным профилем и высокой чистотой поверхности. В практических целях полученные результаты можно использовать при разработке технологий упрочнения поверхностей изделий, работающих в условиях повышенного абразивного износа.

Выводы

Проведен комплекс экспериментальных исследований, позволивших разработать новые технологические процессы получения композиционных и модифицированных структур материалов на основе вольфрамсодержащих твердых

сплавов, углеродистых и инструментальных сталей с использованием методов ЭИС и ИПМ.

Исследования процессов упрочнения элементов деталей различного функционального назначения, проводимые в Белорусском национальном техническом университете (г. Минск, Беларусь), разрабатываемые математические и физические модели процессов структурообразования в упрочняемом слое обрабатываемых материалов, позволяют надеяться на успешное решение поставленной задачи по созданию технологии получения наноструктурированных КМ с повышенным комплексом эксплуатационных свойств импульсными методами электрофизического воздействия.

Появление доступных и малогабаритных источников импульсной энергии (высоковольтных электрических, инверторных), способных создавать направленные высококонцентрированные энергетические потоки с малой длительностью пульсации, открывает новые возможности разработки и создания новых устройств для импульсной электрофизической обработки протяженных поверхностей материалов.

Список литературы

1. *Белявин, К.Е.* Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е.Белявин, Д.В.Минько, О.О.Кузнецик // Инженерно-физический журнал. –2004. –Т.77. –№3. –С.136-143.
2. Исследование особенностей генерации импульсной плазмы в воздухе при атмосферном давлении / Ю.А.Чивель, О.О.Кузнецик, Д.В.Минько, И.С.Никончук, А.Н.Чумаков, К.Е.Белявин // Инженерно-физический журнал. –2011. –Т. 84. –№5. –С.1028-1033.
3. *Маркушев, М.В.* К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для по-

- лучения объемных наноструктурных материалов / М.В.Маркушев // Письма о материалах. - 2011. -Т.1. –С.36-42.
4. *Кожевникова, Г.В.* Построение эпюр контактных напряжений на границе инструмент-заготовка при поперечной прокатке / Г.В.Кожевникова // Трение и износ. –2005. –Т. 26. –№ 1. –С. 94–99.
5. *Щукин, В.Я.* Новое в поперечно-клиновой прокатке / В.Я.Щукин, Г.В.Кожевникова, А.О.Рудович // Кузнечно-штамповочное производство. –1999. –№ 3. – С.35–37.
6. *Панин, В.Е.* Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктур-

ных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В.Е.Панин, В.П.Сергеев, А.В.Панин, Ю.И.Почивалов // ФММ. –2007. –Т.104. –№ 6. –С.650-660.

7. *Белявин, К.Е.* Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е.Белявин, В.В.Мазюк, Д.В.Минько, В.К.Шелег. -Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

8. *Hedvig, R.* Toward quantitative deuterium analysis with laser-induced breakdown spectroscopy using atmospheric-pressure helium gas / R.Hedvig, Z.S.Lie, K.H.Kurniawan, A.N.Chumakov, K.Kagawa, May On Tjia // Journal of Applied Physics -2010. -Vol.107. -No.2, -P.023301 1-5.

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

PULSE ELECTROPHYSICAL METHODS OF CREATING THE COMPOSITE MATERIALS AND MODIFIED STRUCTURES

Minko D. V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Belyavin K. E., D.Sc. (Engineering), Professor,
Sheleg V. K., Corresponding Member of NAS of Belarus, D.Sc. (Engineering), Professor

Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk, 220013, Belarus,
dz-m@tut.by

Abstract: The most effective methods of increasing the constructional materials strength enabling preserving its plasticity are considered. It is shown that the problem of increasing the products strength by creating the material's volume or surface ultra-and nanocrystalline structures in production quantities is not solved up to the end till now. The solution of this problem can be based on the use of high-energy exposure electrophysical methods, which have become widespread for the last years. The most perspective pulse electrophysical methods, such as Electric Discharge Sintering and pulse-plasmic modification are considered, their principles and areas of the most effective application are described. Experimental data and examples of the produced composite materials and modified structures use are presented. It is shown that creation of easily available and small-sized pulse energy sources, capable to create directed highly concentrated energy flows, opens new possibilities for working out and creating the devices for the extended surfaces of materials pulse electrophysical processing.

Keywords: composite material, high-voltage discharge, plasma, modified structure.