

## ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

**В.К. ШЕЛЕГ, Д.В. МИНЬКО, М.А. КРАВЧУК**  
*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Проанализированы новые технологии получения функционально-градиентных материалов с использованием импульсных электрофизических методов. Исследованы технологические режимы создания и модифицирования свойств порошковых и компактных материалов при электроимпульсном, импульсном лазерном и импульсном плазменном воздействии.*

Современные функциональные материалы отличаются от обычных неоднородностью состава, структуры и свойств, которая формируется как в объеме, так и на поверхности материала. Эта неоднородность (градиент) в некоторых случаях может иметь четкие границы раздела между компонентами, когда состав, структура и свойства изменяются скачками, ступенчато, а в некоторых – четкие границы отсутствуют.

Применяемые в настоящее время технологии получения функциональных материалов, заключающиеся в химико-термической, термо-механической или физико-технической обработке, имеют низкую производительность и малую энергоэффективность. Поэтому неслучайно, что внедрение новых электрофизических технологий, разработанных на стыке современных достижений физики высоких энергий и материаловедения, является одним из приоритетных направлений научных исследований. Современные импульсные электрофизические методы, к которым относятся электроимпульсные, импульсные лазерные и импульсные плазменные методы [1], представляются наиболее эффективными и перспективными для промышленного применения и позволяют обеспечить формирование пространственного и поверхностного градиента, как при получении, так и при модифицировании свойств однородных материалов.

Получение функционального градиента в порошковых материалах *электроимпульсными методами* связано с неоднородностью тепловыделения в контактах между частицами, расположенных вдоль направления протекания тока и в поперечном направлении. Быстрый разогрев до температур 5 000–6 000 °С со скоростью  $10^8$ - $10^9$  °С/с, сопровождающийся плавлением материала контактных зон и пластической деформацией частиц, и быстрое охлаждение со скоростью  $10^6$ - $10^7$  °С/с после завершения процесса приводит к появлению неравновесных градиентных структур в области контактных шеек, локально упрочняющих полученный материал.

Установлено увеличение прочности образцов, полученных из частиц титана одного размера, на 40-60 % в направлении электроимпульсного воз-

действия. Пропускание поперечных импульсов тока приводит к выравниванию прочности с одновременным ее повышением на 10-15 %.

Создание градиента структуры и свойств порошковых материалов возможно также формированием слоев из частиц порошка разного размера (рисунок 1) или нанесением градиентных порошковых слоев на поверхность компактной подложки. Установлено, что градиент прочности полученного материала зависит от направления пропускания, а прочность каждого слоя – от количества пропускаемых импульсов электрического тока.

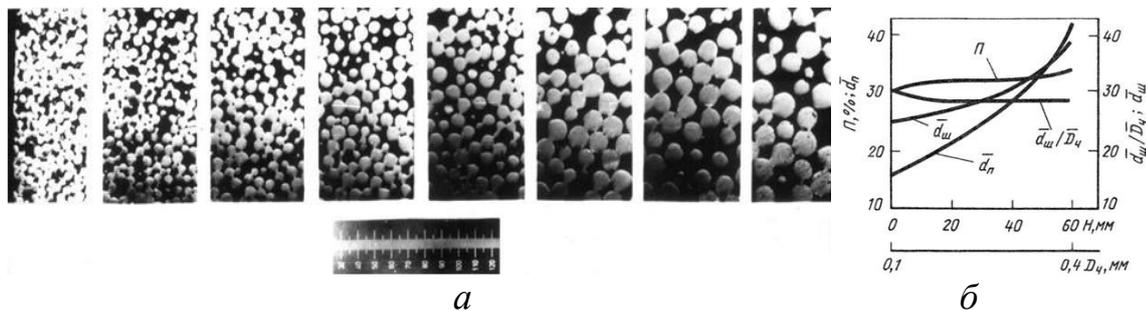


Рисунок 1. – Структурный градиент (а) и изменение пористости  $P$ , относительного диаметра контактной шейки  $du/D_{ch}$ , среднего диаметра пор  $dn$  и среднего диаметра шеек  $du$  в зависимости от изменения диаметра частиц  $D_{ch}$  по высоте  $H$  образца (б), полученного при электроимпульсном спекании полидисперсного сферического порошка титана

При создании градиента структуры и свойств однородных порошковых материалов разработан метод модифицирования путем локального электроимпульсного воздействия, позволяющий повысить прочность исходного материала в местах протекания тока на 65-110 %.

*Импульсные лазерные методы* хорошо зарекомендовали себя как при получении градиентных порошковых материалов, так и при модифицировании поверхности однородных материалов. Показано, что количество жидкой фазы в размере 10-20 % объема частиц обеспечивает устойчивое контактообразование и быстрое остывание расплава за счет теплоотвода, не приводя к перегреву и испарению материала частиц порошка. Установлено, что увеличение мощности лазерного излучения приводит к увеличению размеров контактов верхнего слоя по механизму жидкофазного спекания, в то время как межслойное контактообразование происходит по диффузионному механизму и зависит от длительности воздействия. Получены зависимости пористости и прочности титановых образцов от мощности, скорости сканирования и частоты лазерных импульсов, позволившие определить диапазоны регулирования основных параметров импульсного лазерного воздействия с целью формирования функционального градиента структуры и свойств полученных материалов. Установлено, что при последовательном воздействии импульсов лазерного излучения с постоянной величиной удельной энергии, но с постепенно увеличивающимся размером фокального пятна, между слоями порошка и компактной подложкой образуется переходная зона с гради-

ентом микротвердости 6,1-6,3 ГПа/мм, позволяющая обеспечить повышение прочности сцепления порошковых слоев в 2-4 раза.

*Импульсные плазменные методы* эффективны при поверхностном модифицировании однородных материалов и покрытий. Показано, что кратковременное термоударное воздействие импульсов плазмы в сочетании с высокими скоростями теплоотвода формируют в поверхностных слоях углеродистой стали на глубину 50-100 мкм структурно-модифицированную зону с градиентом микротвердости 20-50 ГПа/мм (рисунок 2). Установлено, что импульсно-плазменная обработка поверхности углеродистых сталей в зависимости от энергии, частоты и длительности импульсов плазмы приводит к снижению шероховатости на 13-16 %.

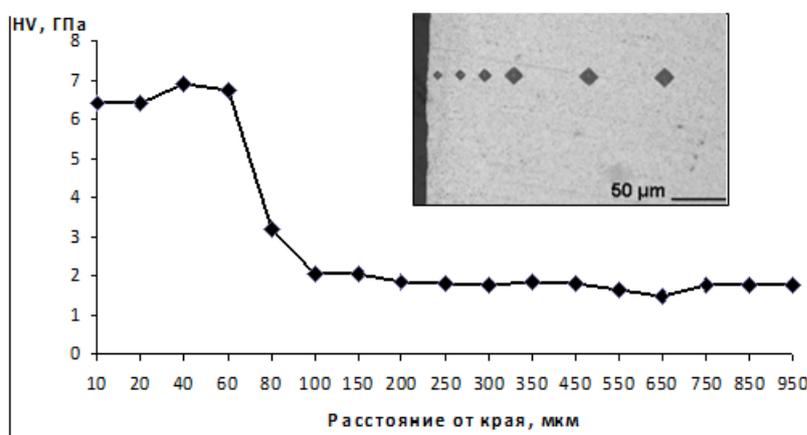


Рисунок 2. – Изменение микротвердости в поверхностном слое стали 45 после импульсно-плазменного воздействия

Зафиксировано повышение микротвердости борированной поверхности стали после импульсного плазменного модифицирования на 17-20 % и создание плавного перехода от борированного слоя к стальной матрице с градиентом микротвердости ~30 ГПа/мм за счет преобразования распределения и формы боридов в структуре слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минько, Д.В. Теория и практика получения функционально-градиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д.В. Минько, К.Е. Белявин, В.К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2020. – 450 с.