

**СТРУКТУРА ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕХАНОХИМИЧЕСКИ  
АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ СОСТАВА Al-Cu-Fe**

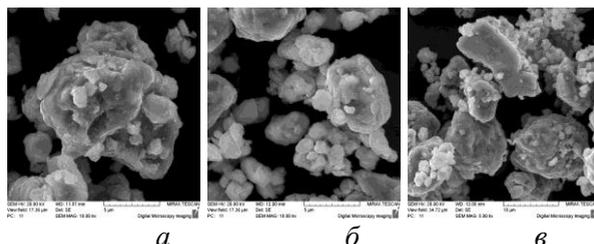
*БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь*

Проблемой развития технологии каталитического сжигания топлива является недостаточная стабильность катализаторов в условиях реакции. При этом скорость механического износа зачастую превышает скорость химической дезактивации катализаторов. Данная проблема может быть решена применением сотовых носителей на основе высокопористых композитов полученных методом гидротермального синтеза из механохимически активированных (МА) порошков [1].

Метод механосинтеза позволяет получать композиционные порошки, содержащие алюминий и металлы 4 периода. Авторы [2] исследовали каталитические свойства поверхности, содержащей интерметаллид  $Al_4Cu_9$  (110), и установили, что катализаторы на основе медь-алюминиевых систем представляют интерес ввиду высокой каталитической активности меди, и могут составить конкуренцию металлам платиновой группы. Система медь-алюминий в сочетании с железом может привести к увеличению прочности и термостабильности носителей катализаторов.

Частицы композитного порошка представляют собой агломераты частиц неправильной формы, на поверхности частиц можно наблюдать большое количество микронеровностей, представляющих собой более мелкие частицы, соединенных с крупными в процессе МА (рисунок 1). Поверхность некоторых частиц содержит следы пластического деформирования в шаровой мельнице. Качественный анализ СЭМ-фото показывает, что средний размер частиц составляет 5 мкм, с увеличением продолжительности процесса МА морфологическая однородность частиц возрастает, а количество крупных частиц

размером 10-15 мкм уменьшается. Однако определенное количество частиц такого размера сохраняется, что обусловлено процессами холодной сварки мелких частиц. В основном размер частиц МА порошка составляет более 1 мкм.



*a* – 6 мин, *б* – 9 мин., *в* – 12 мин:

Рисунок 1 – Структура поверхности частиц порошка Al-Cu-Fe при длительности процесса МА

Исследование микрошлифов МА порошков показало, что частицы имеют характерную для механосинтеза слоистую структуру в виде перемежающихся металлических фаз железа, меди и алюминия. С увеличением продолжительности процесса МА, увеличивается однородность структуры композитных порошков, ширина слоев существенно уменьшается.

Динамика изменения морфологии и размера частиц порошков дают важный материал для анализа протекающих при МА сложных физико-химических процессов формирования внутренней структуры порошков. Результаты дисперсного анализа трехкомпонентных порошков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты гранулометрического анализа порошка Al-Cu-Fe

Время МА, мин	10% частиц имеют размер меньше, $\mu\text{m}$	50% частиц имеют размер меньше, $\mu\text{m}$	90% частиц имеют размер меньше, $\mu\text{m}$
6 мин	3.9	17.3	48.7
9 мин	2.3	9.8	28.8
12 мин	2.5	8.5	24.8

При нанесении суспензии порошка на поверхность титановой подложки [3] МА порошок Al-Cu-Fe заполняет поверхностные поры и углубления в титановой подложке и формирует равномерный слой – мембрана толщиной 600... 800 мкм (рисунок 2,а,б).

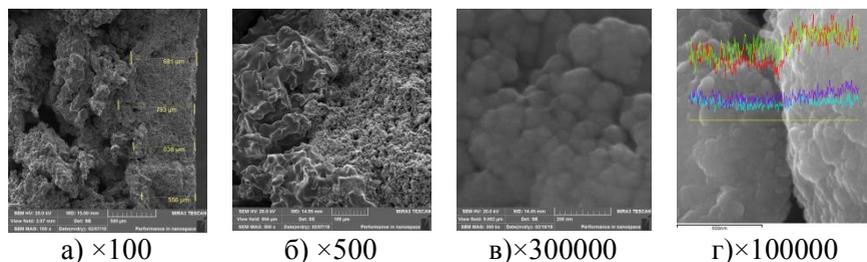


Рисунок 2 – Микроструктура хрупкого излома мембраны на титановой подложке (а,б), наноструктура на поверхности частиц МА порошка Al-Cu-Fe (в) и спектры характеристического рентгеновского излучения элементов, совмещенные с микроструктурой контакта между частицами порошка; (железо – фиолетовый, медь – синий, алюминий – желтый, кислород – красный)

В процессе последующего гидратационного твердения на поверхности частиц порошка формируется слой наночастиц бемита округлой формы размером 50...100 нм (рисунок 2, в). Форма и размер частиц бемита характерны для процесса гидратационного твердения дисперсного алюминия [4]. Наночастицы бемита плотно упакованы и соединены фазовыми контактами, которые обеспечивают формирование механически прочного пористого тела, содержащего систему взаимосвязанных нанопор.

Результаты исследования химического состава поверхности частиц МА порошка и межчастичных контактов (рисунок 2,г) демонстрируют равномерное распределение химических элементов как в частицах, так и в области межчастичных контактов.

Морфология наночастиц бемита, покрывающих поверхность частиц МА порошка, расположенных в глубине мем-

браны (рисунок 3,а), существенно отличается от таковых на поверхности мембраны (рисунок 2,в). Наночастицы в глубине мембраны имеют вытянутую форму, диаметр ~40 нм и длину до 200 нм. В отличие от плотно упакованных частиц сферической формы (рисунок 2,в), наночастицы вытянутой формы в глубине мембраны формируют рыхлую структуру (рисунок 3,а), содержащую поры большого сорбционного объема и большего размера.

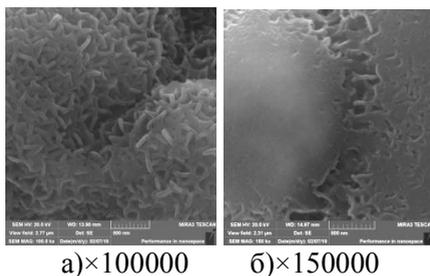


Рисунок 3 – Наноструктура бемита на поверхности МА частиц, расположенных в глубине пористого слоя

Морфология и плотность упаковки наночастиц бемита вероятно зависит от концентрации ацетона в зоне формирования наночастиц из пересыщенного раствора ионов алюмината [4].

Контакты между частицами МА порошка в глубине мембраны также сформированы наночастицами бемита вытянутой формы. В плоскости хрупкого разрушения контакта (рисунок 3,б) содержится система наночастиц бемита, соединенных фазовыми контактами, которые формируют механические и адсорбционно-структурные свойства пористого композиционного материала.

Как было показано в [4,5] главную роль в обеспечении интегральной прочности композитов играет адгезионная прочность соединения химически разнородных компонентов в элементарном объеме композита. Поверхность раздела между мембраной и титановой подложкой следует рассматривать как третий компонент композита. Возникновение этого третьего

компонента - переходного слоя в композите является следствием процессов, протекающих в растворе при твердении дисперсного алюминия. Морфология наночастиц в переходном слое существенно не отличается от морфологии частиц на поверхности МА порошка, наночастицы имеют вытянутую форму и соединены в агломераты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tikhov, S. F. Preparation of porous ceramometal composites through the stages of mechanical activation and hydrothermal partial oxidation of Me–Al powders / S. F. Tikhov, V. A. Sadykov, K. R. Valeev, A. N. Salanov, S. V. Cherepanova, Y. N. Bepalko, V. E. Ramanenkau, Y. Y. Piatsiushyk, S. V. Dimov // *Catalysis Today*, v. 246, 2015, pp.232–238.

2. Piccolo, L. Intermetallic Compounds as Potential Alternatives to Noble Metals in Heterogeneous Catalysis: The Partial Hydrogenation of Butadiene on  $g\text{-Al}_4\text{Cu}_9$  (110) / L. Piccolo, L. Kibis, M.-C. De Weerd, E. Gaudry, J. Ledieu, V. Fournee // *Chem-CatChem*. 2017. V. 9. N 12. P. 2292-2296.

3. Евтухова, Т. Е. Пористый композит для гетерогенного катализа / Т. Е. Евтухова, В. Е. Романенков, С. Ф. Тихов, Е. Е. Петюшик, Т. И. Пинчук, Д. И. Клевченя, Н. А. Афанасьева // *Вести НАН Беларуси*. – 2015. – №4. – С. 11 – 15.

4. Романенков, В. Е. Физико-химические основы гидратационного твердения порошковых сред: Монография / В. Е. Романенков, Е. Е. Петюшик. – Мн.: Беларуская навука, 2012. – 197 с.

5. Романенков, В. Е. Некоторые области применения пористой наноструктурной керамики из порошков алюминия / В. Е. Романенков, Е. Е. Петюшик, Т. Е. Евтухова, Т. И. Пинчук, С. Ф. Тихов // *Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. ст. / редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 459 – 470.