

Особенности деагломерации электровзрывных двухкомпонентных янус-наночастиц Cu–Fe*

О.В. Бакина¹, Н.Ю. Федотов¹, М.И. Лернер¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Впервые рассмотрены особенности ультразвуковой деагломерации янус-наночастиц Cu–Fe. Наночастицы были получены при совместном электрическом взрыве медной и железной проволок в атмосфере аргона. Средний размер частиц составил 63 нм, фазовый состав представлен только фазами α -Fe и Cu, поверхность частиц обогащена ионами Cu^{2+} и Fe^{3+} . Зета-потенциал наночастиц (НЧ) Cu–Fe представлял собой среднеарифметическое значение зета-потенциалов отдельных НЧ Cu и НЧ Fe, взятых в эквимольных количествах. Установлено, что ультразвуковая деагломерация частиц Cu–Fe сопровождалась коагуляцией после 20 с воздействия, а время диспергирования, обеспечивающее наименьший средний размер агломератов, являлось средним между временами диспергирования НЧ меди и железа.

Ключевые слова: деагломерация, двухкомпонентные наночастицы, ультразвуковое диспергирование, электрический взрыв проволок.

Введение

Двухкомпонентные наночастицы (дНЧ) – это частицы, которые состоят из комбинации двух различных металлов или их соединений, разделенных между собой на уровне одной частицы четко выделенной границей раздела фаз [1]. Ранее сообщалось, что дНЧ более эффективны, чем монометаллические [2]. В большом количестве работ представлено разнообразие комбинаций соединений, способных образовывать дНЧ. Тем не менее некоторые распространенные комбинации включают использование переходных металлов, таких как медь и железо [3–5]. Эти два металла можно комбинировать как между собой, так и с другими металлами для получения различных свойств, включая расширение их биомедицинского применения.

В настоящее время среди методов получения дНЧ сложного состава особое внимание уделяется физическим методам. Это связано с их достаточной производительностью, биологической безопасностью и отсутствием органических примесей и других загрязнений. Электрический взрыв проводников (ЭВП) позволяет получать нанопорошки со средним размером 40–90 нм практически любых металлов, сплавов, оксидов, нитридов, карбидов металлов с производительностью не менее 200 г/ч [6]. Преимуществами ЭВП-технологии перед другими физическими методами является возможность варьирования параметров синтеза, использования одновременно нескольких проволок при взрыве и относительно узкая функция распределения НЧ по размерам [7]. Относительно недавно авторами работы [8] было предложено применение ЭВП двух свитых проволок для получения дНЧ со структурой янус-НЧ. Преимущественное формирование НЧ с такой структурой определяется соотношением температур плавления и плотностей металлов, также величиной перегрева проволок и особенностями взаимного растворения компонентов в бинарных системах согласно равновесным диаграммам состояния [9]. В соответствии с правилами Юм – Розери расслоение преобладает у пар металлов с различным типом кристаллических решеток [10]. Кроме того, если температура плавления одного из металлов выше, то в приповерхностные области частиц будет вытесняться металл с меньшей температурой плавления. Рост величины перегрева металлов при ЭВП приводит к разделению металлических компонентов и образованию янус-НЧ.

При получении НЧ ЭВП они вступают в контакт друг с другом, образуя агломераты и агрегаты. Если речь идет о монометаллических НЧ с приблизительно одинаковым размером, то в зависимости от температуры могут формироваться агрегаты, связанные силами Ван-дер-Ваальса (более низкая температура), и агломераты, которые связаны перешейками металла (более высокая температура) [11]. Как правило, чем меньше температура плавления металла, тем сильнее агломерированы НЧ. Образование перешеек, происходящее между НЧ за счет низкотемпературного плавления в точке контакта, связано с размерным фактором и термодинамическим фактором, обу-

* Работа выполнена в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Новые материалы специального назначения», соглашение о предоставлении субсидии от 25 июня 2025 г. № 075-15-2025-589.