

Е.В. КОРОЛЕВ, д-р, техн. наук; А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, инженер-испытатель, Научно-образовательный центра по направлению «Нанотехнологии», Московский государственный строительный университет

Эффективность физических воздействий для диспергирования наноразмерных модификаторов*

Современная нанотехнология строительного материаловедения основывается на введении в материал заранее синтезированных наноразмерных добавок различной природы. Для их распределения по объему материала часто применяют ультразвуковую обработку. Однако исследований, направленных на определение эффективности такой обработки, крайне мало. В частности, в работе [1] показано, что возникающие при ультразвуковом воздействии силы (силы Бьеркнеса, Бернулли и др.) должны приводить в основном к коагуляции дисперсных фаз, а диспергирование проявляется в некоторых локализованных объемах. В работе [2] для гомогенизации фуллеренсодержащих наномодификаторов предложено использовать нагрев среды-носителя до температуры 60°C; то же предложение теоретически высказано в [1], а дополнительное подтверждение возможности реализации указанного механизма представлено в [3]. Однако в научно-технической литературе практически отсутствуют экспериментальные данные по характеристикам дисперсных систем, содержащих наноразмерные модификаторы и гомогенизированных ультразвуковой обработкой. В частности, в [1] получены зависимости оптической плотности коллоидных растворов, содержащих астралены, от продолжительности ультразвуковой обработки. Анализ указанных зависимостей показывает, что изменение оптической плотности среды-носителя (раствор глицерина) выше изменения оптической плотности глицериновых растворов астраленов. Кроме того, по указанной величине затруднительно проводить оценку дисперсного состава.

Теоретически тепловое воздействие более эффективно [1], так как в дисперсной системе устанавливается седиментационно-диффузионное равновесие, которое с повышением температуры способствует не только диспергированию агрегатов, но и выравниванию концентрации частиц по объему. Однако экспериментальных данных, подтверждающих эффективность тепловой обработки, в научно-технической литературе также нет.

Известен критерий Шукина–Рейбиндера [4], согласно которому для обеспечения самопроизвольного диспергирования поверхностное натяжение на границе раздела фаз не должно превышать величины:

$$\sigma_{12} \leq \gamma \frac{kT}{r^2},$$

где σ_{12} – поверхностное натяжение на границе жидкость – твердое тело; γ – константа ($\gamma = 10-15$); r – радиус частицы; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Для $r \in I(10; 1000)$ нм $\sigma_{12} \in I(0,4; 4 \cdot 10^{-4})$ мН/м. Величина σ_{12} зависит от индивидуальных свойств контактирующих сред. Поверхностное натяжение среды σ_i можно представить моделью, имеющей вид плоскости, на

которой расположены нескомпенсированные связи с энергией $u_{l,i}$ в количестве $N_{s,i}$

$$\sigma_i = N_{s,i} u_{l,i}.$$

Для плоскостной модели

$$N_{s,i} = N_{o,i} / S_o = a_{o,i} \rho_i / m_{a,i} = a_{o,i} / V_{m,i};$$

$$u_{l,i} = U_{c,i} / N_a \eta_i,$$

где $a_{o,i}$ – толщина молекулярного (атомного) слоя; $V_{m,i}$ – молярный объем; $U_{c,i}$ – энергия сублимации; η_i – координационное число; N_a – число Авогадро.

Отсюда:

$$\sigma_i = \frac{(U_{c,i} - RT) a_{o,i}}{\eta_i V_{m,i}}.$$

При форме поверхности в виде сферы

$$\sigma_i = \frac{(U_{c,i} - RT) a_{o,i}}{\eta_i V_{m,i}} \left[D - \frac{(D - 2a_{o,i})^3}{D^2} \right].$$

При замене $D = \kappa a_{o,i}$ получим:

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \frac{(U_{c,i} - RT)}{\eta_i V_{m,i}} a_{o,i} \left[3 - 2 \frac{(\kappa - 2)}{\kappa^2} \right].$$

При $\kappa \gg 2$ величина $a_{o,i} \left[3 - 2 \frac{(\kappa - 2)}{\kappa^2} \right] \approx 3a_{o,i}$,

тогда поверхностное натяжение больших частиц сферической формы равно:

$$\sigma_{\infty,i} = \frac{(U_{c,i} - RT)}{\eta_i V_{m,i}} a_{o,i}.$$

При распространении представленных рассуждений на межфазную границу раздела следует, что формирование σ_{12} является процессом образования нового вещества, обладающего индивидуальными параметрами: U_c , η , V_m и a_o . Аналогичное заключение следует при записи закона Юнга в виде:

$$\gamma \frac{kT}{r^2} = \sigma_{23} - \sigma_{13} \cos \Theta,$$

где σ_{23} – поверхностное натяжение на границе твердое тело – газ; σ_{13} – то же, жидкость – газ; Θ – краевой угол смачивания.

Учитывая малую величину $\gamma kT / r^2$ очевидно, что при $\Theta \rightarrow 180^\circ$ условие

$$\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{13} \cos \Theta} \rightarrow 1$$

не выполняется, а при $\Theta \rightarrow 0^\circ$ оно выполняется только при

$$\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{13}} \rightarrow 1.$$

Указанное реализуется только при формировании на границе раздела фаз соединения, которое по свойствам

*Печатается при поддержке гранта Президента РФ МД-6090.2012.8.