

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ АЭРОГЕЛЯ

Как органические, так и неорганические полимеры широко применяются в качестве защитного покрытия благодаря своим механическим свойствам, превосходной адгезии и химической инертности. Однако под действием содержащейся в рабочей среде влаги эти свойства могут ухудшаться, и для увеличения срока эксплуатации прибегают к неорганическим добавкам: углеродным нанотрубкам, бороволокнистым и стекловолоконным армирующим элементам. Зачастую конечное свойство материала превосходит суммарный вклад отдельных компонентов материала. Таким образом, сочетая наночастицы аэрогеля различных размеров и геометрических форм с эпоксидной смолой, благодаря их необычным свойствам, можно добиться улучшения механических, электрических и термических свойств конечного композитного материала[1].

Характеристика аэрогеля. Визуально аэрогель можно охарактеризовать, как прозрачный или полупрозрачный, хрупкий и пластичный материал, который легко может быть деформирован. Наиболее характерные свойства аэрогеля:

- Очень низкая плотность. В зависимости от степени пористости и размеров пор плотность варьируется от 1 до 150 кг/м³, для сопоставления плотность воздуха составляет 1,225 кг/м³.

- Высокая прочность. Образец аэрогеля может выдержать нагрузку в 2000 раз большую, чем собственный вес.

- Гидрофобность и сопротивление к паропроницанию (примерно в десять-пятнадцать раз выше, чем у минеральных ват). Поверхностные свойства аэрогеля можно модифицировать, например если ввести группу -SiX₃. Этот процесс называется силилирование[2].

- Крайне низкая теплопроводность (до 0.016 Вт/м·К), в 10 раз ниже, чем у дерева. Более того чрезвычайно малый размер пор (меньше, чем свободный путь прохода молекул воздуха) влияет на малую величину теплопроводности.

- Низкая скорость распространения звука (до 70 м/с). Скорость звука, которую способен пропускать аэрогель, на данный момент является самой низкой скоростью распространения звука среди неорганических материалов.

- Чрезвычайно низкий коэффициент преломления света (до 1.0002). Световая волна, проходящая через поверхность, частично отражается, частично поглощается, частично проходит дальше.

Среди других свойств аэрогеля стоит отметить каталитические свойства (активность, селективность, сопротивление к деактивации), а также электрическую проводимость, которая может изменяться в широких пределах в зависимости от химического соединения, которое лежит в основе материала, помимо прочих свойств, материал также хорошо работает при циклическом температурном режиме.

Физико-механические свойства композита на основе наночастиц аэрогеля. Вклад дисперсных частиц в формирование прочностных свойств композита определяется главным образом физико-механическими процессами на поверхности раздела полимер-наполнитель. Для того, чтобы охарактеризовать физико-механические свойства вводят такие параметры, как степень пористости и размер пор. Аэрогель представляет собой структуру из открытых пор, в которые могут проникать органические макромолекулы, в связи с чем могут возникнуть трудности при получении композита. Если смачиваемая способность прекурсора полимера в случае его высокой вязкости, превосходит адгезию внутри каркаса, то пористость, которая относится к пустотам внутри полимерной матрицы, меняет свойства иначе, чем сам аэрогель.[3] Поэтому, содержание аэрогеля в полимерной пленке носит ограниченный характер, так как при достижении определенной концентрации наночастицы начинают выталкиваться из слоя матрицы из-за того, что связь между частицами аэрогеля и эпоксидом ослабевает. Для решения последней проблемы используется либо поверхностная модификация (силилирование) аэрогеля, либо изменение вязкости прекурсора[2].

Таблица 1 - Механические свойства композита из эпоксидной смолы с добавкой углеродного аэрогеля

Образец	Модуль Юнга (ГПа)	Деформация текучести %	Предел прочности на растяжение (МПа)	Ударная вязкость (МПа)
УА 0%	2.27	2.50	46.24	0.64
УА 0.5%	2.57	2.65	36.06	0.67
УА 1%	2.41	2.82	57.67	0.89
УА 2%	2.84	2.99	69.21	1.16
УА 3%	3.98	3.69	74.06	1.87

УА(%) – содержание углеродного аэрогеля в образце

Как было показано в таблице 1, между механическими показателями (модулем Юнга, ударной вязкостью и прочностью), полученными испытанием на растяжение, и содержанием наночастиц в образце наблюдается зависимость, при том эта зависимость достаточно чувствительная[4].

Испытания на сжатие показывают, что даже при деформации на 25% композиционный материал сохраняет свои прочностные свойства. Кривая деформации, как показано на диаграмме ниже (рис. 1), выходит на плато напряжения, что указывает на способность к поглощению разрушения на сжатие, по аналогии с синтактовыми пеноматериалами[3].

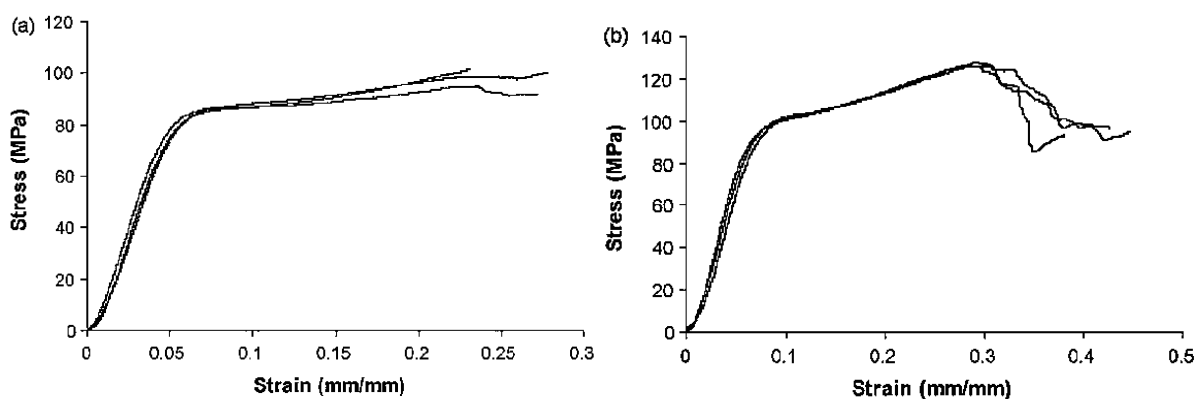


Рисунок 1. Кривые деформации: а – композит плотностью 980 кг/м³, б – с плотностью 1070 кг/м³

Антикоррозионные свойства. В композите, содержащем наночастицы аэрогеля, барьерное свойство обусловлено «извилистостью» пути, по которому коррозионно-активный агент окружающей среды достигает субстрата. Высокая степень дисперсности аэрогеля и его гидрофобность также вносят вклад в уменьшение диффузии воды в покрытие. Таким образом добавки аэрогеля приводят к тому, что по сравнению со слоем чистого полимера слой композита имеет ярко-выраженную антикоррозионную способность, также улучшаются некоторые механические характеристики такие как ударная вязкость и ударная прочность материала. Испытания на адгезию во влажном состоянии (после экспозиции в солевом тумане) показывают, что содержащиеся в слое композиционного покрытия наночастицы значительно улучшают этот показатель. Хорошая адгезия препятствует отслаиванию композиционного материала и развитию контактной коррозии.

Качество эпоксидного покрытия с добавками аэрогеля можно оценить по результатам растровой электронной микроскопии.

ВЫВОДЫ

Использование аэрогеля вместо других наноматериалов имеет ряд преимуществ:

- Их пористая структура соотносима с размером пор мезоструктур ($10^{-7} - 10^{-3}$ м), и поры в ней являются открытыми, что позволяет их прямо использовать в качестве армирующей добавки (для сравнения в основе текстолита лежат тканые волокнистые элементы, для которых требуется специальное оборудование);

- Хотя по ряду свойств композит с добавкой аэрогеля уступает такому же с добавкой нанопластинок графена, первый имеет преимущество, заключающееся в своей дешевизне[4];

- Высокая плотность композита обычно приводит к тому, что растет модуль упругости при сжатии, а также такой композит может иметь низкий предел текучести, однако из-за низкой плотности аэрогеля этого удастся избежать[3].

Среди недостатков можно отметить:

- Риски на производстве, связанные с возможной опасностью технологического процесса получения аэрогеля;

- Использование дисперсных минеральных наполнителей, в частности имеющих высокую твердость, при высоком давлении в условиях эксплуатации ведет к абразивному износу и становится неизбежным коррозионный износ;

- Аэрогель является активным катализатором некоторых химических реакций, что сужает область применения композита с его добавкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Akbarzade, M. R. Shishesaz, I. Danaee, and D. Zarei // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2017. – Vol. 53, No. 2 – pp. 279–286.

2. W. Hui, G. Yaqin, Z. Linkge // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2015. – Vol. 428. – pp. 1-5.

3. N. Gupta and W. Ricci // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 198. – pp. 178–181.

4. M. Naderi, M. Najafi and M. Agha Bararpour // Polymer Composites. – 2019. – p. 1-13.