

И. О. Лаптик, инж.,
Н. Р. Прокопчук, д-р хим. наук, член-корр. НАН Беларуси, проф.
(БГТУ, г. Минск)

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РЕБИНДЕРА НА ЭПОКСИДНЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Эффект Ребиндера – это снижение прочности твердого тела жидкостью, находящейся на его поверхности [1]. Разрушение полимера с адсорбированной жидкостью – процесс развития новых поверхностей, сопровождающийся разрывом межмолекулярных связей, ослабленных жидкостью, а, следовательно, существенным уменьшением работы разрушения, что проявляется снижением его прочности. Снижение прочности материала осуществляется в результате снижения потенциального барьера разрыва химических и межмолекулярных связей U_0 согласно [2]:

$$\sigma = \gamma^{-1}(U_0 - R \cdot T \cdot \ln \tau / \tau_0),$$

где γ – структурно-чувствительный коэффициент, не изменяющийся при воздействии жидкой физической агрессивной среды на поверхности полимера (без его набухания); T – абсолютная температура; τ – время действия силы при испытаниях.

Отсюда понижение прочности σ на прямую связано с понижением параметра U_0 . Поскольку параметр U_0 , в свою очередь, складывается из энергий разрыва химических и межмолекулярных связей, снижение прочности полностью связано со снижением межмолекулярных взаимодействий [2]. Эффект Ребиндера наиболее ярко проявляется в жестких напряженных состояниях при упругом деформировании полимера.

Нами разрабатывается концепция, согласно которой, повышение устойчивости к внешним воздействиям наномодифицированных композитов обусловлено образованием наночастицами и полярными группами макромолекул матрицы сил Ван-дер-Ваальса. При этом наряду с размером наночастиц, важнейшая роль принадлежит величине электрического заряда на их поверхности [3].

В этой связи цель настоящей работы – доказать образование наночастицами межмолекулярных взаимодействий с полярными эпоксидными группами покрытий по стали путем снижения эффекта Ребиндера при наномодифицировании.

Объектами исследования служили эпоксидная смола KER 828 и отвердители аминного типа: КСА 4303 (изофорондиамин), Cardolite 540 (феналкамин).

Твердость покрытий определяли с помощью маятникового прибора ТМЛ по ГОСТ 5233–89; прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73; адгезию методом решетчатых надрезов согласно ГОСТ 31149–2014.

Результаты испытаний покрытий с сухой и влажной поверхностями, содержащих наночастицы различной природы, представлены в таблице.

Таблица – Влияние наночастиц на проявление эффекта Ребиндера в защитных эпоксидных покрытиях по стали

№ п/п	Отвердитель	Нано-частицы 0,005 %	Гель-фракция, %	Воздушная поверхность			Водная поверхность		
				Б _у , см	Тв., отн. ед.	А, балл	Б _у , см	Тв., отн. ед.	А, балл
1	КСА 4303 + смола KER 828	–	52,0	50	0,49	2	30	0,35	3
2		TiO ₂	64,5	60	0,60	1	45	0,50	2
3		ZnO	57,0	60	0,61	1	45	0,49	2
4		Al ₂ O ₃	65,5	60	0,61	1	45	0,49	2
5		SiO ₂	74,0	55	0,57	1	40	0,48	2
6		УДА СП	65,0	60	0,60	1	45	0,52	2
7		АШ-А	66,0	60	0,59	1	45	0,41	2
8	Cardolite 540 + смола KER 828	–	60,0	50	0,52	3	30	0,39	4
9		TiO ₂	87,0	70	0,80	2	55	0,63	3
10		ZnO	78,5	60	0,66	2	45	0,49	3
11		Al ₂ O ₃	80,5	65	0,75	2	45	0,61	3
12		SiO ₂	77,0	60	0,65	2	40	0,50	3
13		УДА СП	87,0	70	0,79	2	55	0,63	3
14		АШ-А	79,0	65	0,71	2	50	0,50	3

Примечание. Б_у – прочность при ударе, см; Тв. – твердость, отн. ед.; А – адгезия, балл.

Анализ данных таблицы показывает, что наномодифицирование даже в свехмалых количествах (0,005 мас.%) существенно повышает гель-фракцию (с 52 до 87%), прочность при ударе (с 50 до 70 см), твердость (с 0,049 до 0,79 отн. ед.) за счет образования сил Ван-дер-Ваальса наночастицами и полярными эпоксидными группами смолы.

Эффект Ребиндера на немодифицированных покрытиях проявляется очень ярко: прочность при ударе снижается с 50 до 30 см (образец № 1 и № 8); твердость покрытий снижается с 0,49 до 0,35 отн. ед. (образец № 1) и с 0,52 до 0,39 (образец № 8), адгезия ухудшается с 2 до 3 баллов.

Все наночастицы, увеличивая межмолекулярные взаимодействия в покрытиях, замедляют снижение прочности при ударе, твердости и адгезии адсорбированной водой, т.е. снижают действие эффекта Ребиндера.

Так, прочность при ударе покрытия с адсорбированной водой на основе KER 828 и КСА 4303, не содержащего наночастиц, равна 30 см, а наномодифицированных образцов (№№ 2–7) равна 45 см, т.е. выше на 50%. Еще выше положительное влияние наночастиц на системе KER 828 и Cardolite 540: прочность при ударе покрытий (образцы № 9 и № 13) составляет 55 см против 30 см (образец № 8). Эффект упрочнения покрытий с адсорбированной водой наночастицами TiO_2 и УДА СП достигает 83%.

Твердость покрытий также возрастает при наномодифицировании: с 0,35 до 0,50 отн. ед. (образцы №№ 1–7), т.е. на 43%, и с 0,39 до 0,63 отн.ед. (образцы №№ 8–14), т.е. на 62 %. Максимальный эффект на обоих системах достигается наночастицами TiO_2 и УДА СП, обладающими наибольшим электрическим зарядом на своей поверхности [3]. Установленное нами впервые замедление наночастицами снижения механических свойств покрытий адсорбированной водой на 80–60% имеет важное практическое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел / М.: Наука, 1974. – 560 с.
2. Тынный А. Н. Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред – Киев: Наукова думка, 1975. – 208 с.
3. Прокопчук Н. Р., Лаптик И. О. Роль энергетического состояния поверхности наночастиц в формировании структуры и свойств полимерных нанокомпозитов / Полимерные материалы и технологии. – 2025. – № 3. – С. 28–35.