

УДК 678.5

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н.

ВЛИЯНИЕ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СРЕД НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Современный уровень развития техники позволяет создавать защитные градиентные фурано-эпоксидные покрытия с заданным распределением свойств по высоте поперечного сечения с учетом условий эксплуатации, что дает возможность существенно повысить долговечность защищаемых конструкций (из бетона или металла) с различной функциональной нагрузкой на определенные части и слои сечения конструктивных элементов.

Однако, на сегодняшний момент не существует единого подхода к расчету, оценке и прогнозированию работоспособности металлических и железобетонных конструкций с градиентными полимерными покрытиями, в том числе и фурано-эпоксидными.

В ряде случаев уровень надежного функционирования защитных покрытий обусловлен не только градиентом свойств фурано-эпоксидных композитов по высоте поперечного сечения (толщине покрытия δ), но и по длине контактной зоны l . Кроме этого, на характер работоспособности защитных покрытий существенное влияние оказывает природа эксплуатационных сред, в которых функционирует система.

Представляло интерес исследовать влияние структуры защитной системы (градиентного, ортотропного типов), а также природы эксплуатационных сред на работоспособность фурано-эпоксидных покрытий на поверхности металлических и бетонных изделий.

Известно [1], что при работе изгибаемых бетонных или металлических изделий с полимерными покрытиями в контактном (межфазном) слое возникают значительные сдвигающие (касательные) $\tau = \tau(z)$ и нормальные напряжения $\sigma = \sigma(x)$. При этом касательные напряжения характеризуются неравномерным распределением по длине изделия и имеют максимальные значения на его краях, а нормальные – неоднородны по толщине. Поэтому для эффективной совместной работы элемента (из бетона и металла) и полимерного покрытия представляет интерес оценить величину касательных напряжений в фурано-эпоксидных покрытиях $\tau = \tau(z)$, в том числе и на краях изделий.

Соединение фурано-эпоксидного (ФАЭД) покрытия с абсолютно жестким основанием (бетон, металл) в разрабатываемых системах может осуществляться посредством промежуточного (адгезионного) слоя, состоящего либо из полиацеталей (поливинилбутирала – ПВБ, поливинилбутиральфурфурала – ПВБФ и др.), либо из композиции на основе фурано-эпоксидного реакционноспособного олигомера с повышенным содержанием эпоксидного олигомера (ФАЭД-80, ФАЭД-70 и др.). Толщина адгезионного слоя $h = h(x)$ в общем случае переменна.

С целью минимизации влияния на интегральный показатель остаточных внутренних напряжений от химической усадки структурирование защитных систем на основе ФАЭД проводили выше температуры стеклования по следующему ступенчатому режиму: выдержка при 20 °С в течение 24 ч, 60 °С – 2 ч, 80 °С – 1 ч, 100 °С – 5 ч, охлаждение до комнатной температуры осуществляли со скоростью 2–5 °С/мин.

Кроме этого, были исследованы фурано-эпоксидные композиции, функционально модифицированные олигомерными и полимерными материалами, отличающимися химической природой от ФАЭД. Содержание модифицирующего ингредиента в композиции (каменноугольной смолы – КУС, битума – БН, госсиполовой смолы – ГС, низкомолекулярного полиизобутилена – НПИБ) составляет 20–30 %.

В качестве модельных эксплуатационных сред выбраны дистиллированная вода и уайт-спирит, наиболее полно характеризующие спектр реальных эксплуатационных сред.

Распределение напряжений в адгезионном слое может быть представлено в виде [2]:

$$\frac{h_{\xi}}{h_0} \cdot \frac{G_0}{G_{\xi}} = \frac{\tau}{\tau_{\xi}} \cdot \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} [F(\xi) - F(0)] \right\},$$

где G_0 и G_{ξ} – модули сдвига (МПа) адгезионного слоя в начале координат и при различном значении безразмерной координаты $\xi = x/l$; E – модуль упругости (МПа) материала адгезионного слоя; τ_0, τ_{ξ} – касательные напряжения в покрытии, МПа.

В приведенной зависимости $F(\xi) = \int I(\xi) d(\xi)$, где $I(\xi)$ определяется по формуле: $I(\xi) = \int_0^{\xi} \frac{\tau(\xi)}{\tau_0} d\xi$. А отношение $f(\xi) = \frac{\tau_{\xi}}{\tau_0}$ определяет характер распределения касательных напряжений $\tau(z)$ в адгезионном слое по длине контактной зоны l . С целью выравнивания касательных напряжений в зоне контакта фурано-эпоксидного покрытия с жестким основанием, примем функцию $f(\xi) = 1$. Тогда приведенные выше выражения имеют вид $I(\xi) = \xi$, $F(\xi) = \xi^2/2$, $F(0) = 0$. Исходя из этого распределение напряжений в адгезионном слое можно представить в виде [2]:

$$\frac{h_{\xi}}{h_0} \cdot \frac{G_0}{G_{\xi}} = 1 + \frac{G_0}{2 \cdot E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \cdot \xi^2.$$

На основании анализа данной зависимости возможны два варианта решения поставленной задачи:

1. Приняв, деформативные параметры адгезионного слоя (G_0 и G_{τ}) стабильны на протяжении всей длины контактной зоны l , т.е. $G_0/G_{\xi} = 1$, то распределение напряжений τ в адгезионном слое регулируется путем изменения его толщины h , которое можно оценить, исходя из формулы:

$$\frac{h_{\xi}}{h_0} = 1 + \frac{G_0}{2 \cdot E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \cdot \xi^2.$$

2. Если принять стабильной толщину адгезионного слоя h , т.е. $h_{\xi}/h_0 = 1$, то целенаправленное регулирование распределения касательных напряжений τ в нем можно осуществлять путем изменения деформационных свойств (G_0 и G_{τ}) этого слоя:

$$\frac{G_{\xi}}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{G_0}{2 \cdot E} \cdot \frac{l}{\delta} \cdot \frac{l}{h_0} \cdot \xi^2}$$

Модули сдвига G_0 материалов адгезионного слоя (табл. 1) определяли при известных значениях модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν из соотношения [3]: $G_0 = E/[2(1 + \nu)]$. Оценку распределения касательных напряжений фурано-эпоксидного покрытия со средней толщиной $\delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м проводили на базовой длине образца $l = 0,03$ м, т.е. $l/\delta = 10$. Толщина адгезионного слоя h_0 находилась в пределах $h_0 = (0,2-0,5) \cdot 10^{-3}$ м. Соотношение l/h_0 на исследованных образцах составляло $l/h_0 = 1-10$.

Таблица 1 – Деформационно-прочностные параметры материалов адгезионного слоя

Материал	E , МПа	G , МПа	ν	G/E
ФАЭД-80(20) + АФ-2	2750	1040	0,32	0,3782
ПВБ	1600	590	0,37	0,3656
ПВБФ	2400	900	0,33	0,3758
ПВФ	4000	1540	0,30	0,385
ПВЭ	4000	1550	0,30	0,3875
ПВФЭ	3200	1220	0,31	0,3817

На рис. 1–2 приведены типичные для исследованных систем (на примере ПВБФ) зависимости изменения соответственно толщины адгезионного слоя при различном модуле сдвига и модуля сдвига слоя при постоянной ее толщине на разном масштабном уровне – l/h . В связи с близкими значениями соотношениями G/E (табл. 1) характер изменения и уровень значений анализируемых параметров для всех исследованных адгезионных слоев существенно друг от друга не отличается.

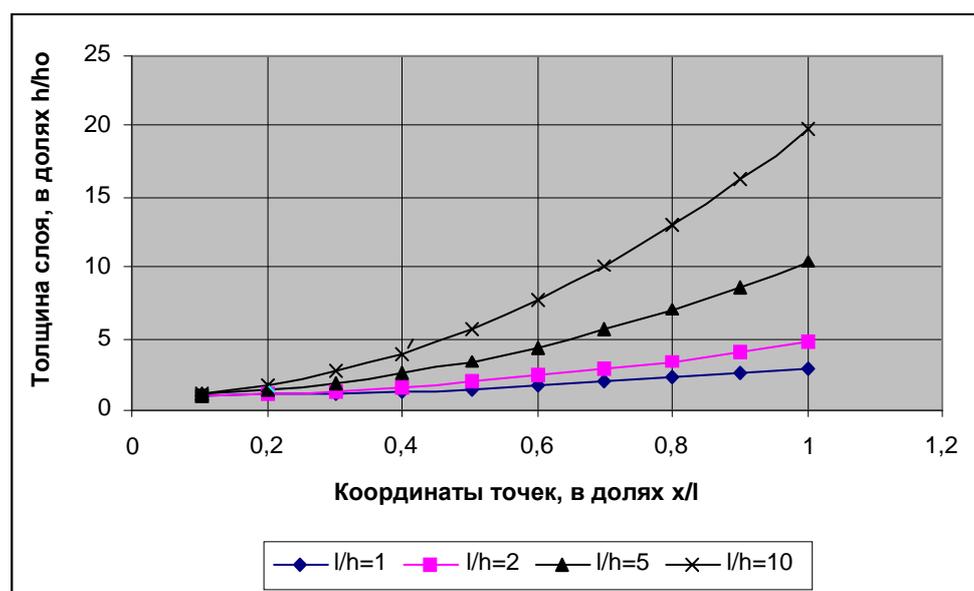


Рисунок 1 – Изменение толщины адгезионного слоя (ПВБФ) при модуле сдвига $G = \text{const}$

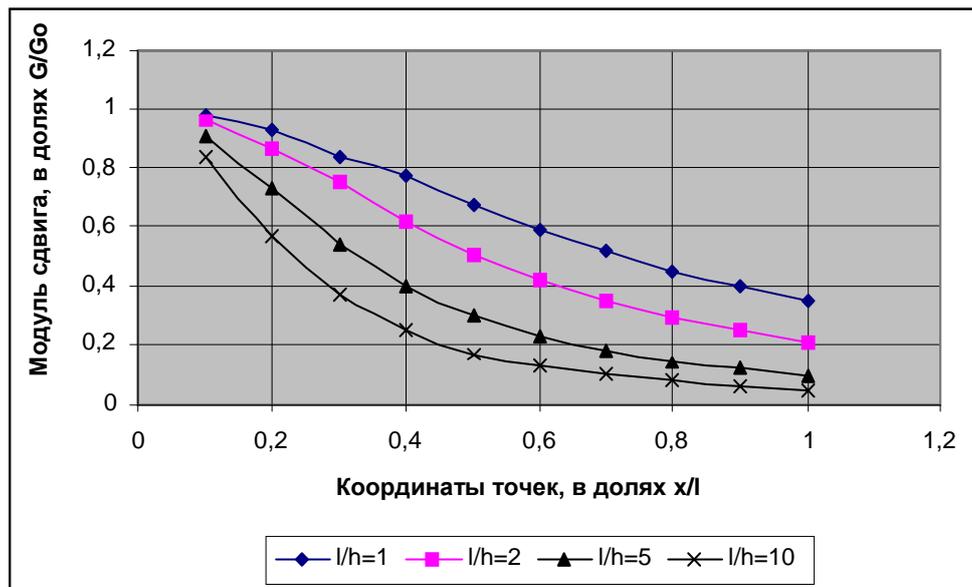


Рисунок 2 – Изменение модуля сдвига адгезионного слоя (ПВБФ) при толщине $h = \text{const}$

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что касательные напряжения существенно отличаются от нуля на конечных участках защищаемого фурано-эпоксидным градиентным покрытием элемента (металла или бетона).

С ростом длины зоны контакта l между полимерным покрытием и жесткой подложкой (увеличением l/h) существенно возрастают сдвиговые напряжения τ . Так например, в точке с координатой $\xi = 0,5$ касательные напряжения τ выше в сравнении с началом отсчета ($\xi = 0$) на 30 % при $l/h = 1$, на 60 % – $l/h = 2$, в 3,35 раза при $l/h = 5$ и в 4 раза при $l/h = 10$.

Регулировать уровень сдвиговых напряжений τ в покрытии можно, изменяя либо толщину адгезионного слоя h , либо его жесткость (модуль упругости E).

При формировании градиентного фурано-эпоксидного покрытия на поверхности бетона, являющегося капиллярно-пористым материалом (характеризуется наличием сквозных и замкнутых пор, капилляров, трещин и др.) регулировать уровень и характер распределения касательных напряжений τ в зоне контакта целесообразно путем изменения толщины адгезионного слоя, увеличив или уменьшив глубину проникновения полимерного материала в бетон. Для стабилизации уровня напряжений на краях защищаемых элементов возможна пропитка слоя бетона на глубину 6–15 мкм (рис. 1).

При этом происходит упрочнение наружных слоев бетона, обусловленное заполнением материалом адгезионного слоя поверхностных пор, микротрещин, капилляров и повышением поверхностной энергии. В случае получения защитного градиентного покрытия на металлических подложках, практически не обладающих пористостью, целенаправленно варьировать уровнем сдвиговых напряжений можно, изменяя модуль упругости адгезионного материала, вводя в его состав оптимальные количества (как правило, до 6–9 масс. %) низко- или высокомодульных дисперсных наполнителей (например, соответственно суспензионного ПВХ и кварцевой муки).

Диффузионные остаточные напряжения, возникающие вследствие сорбции низкомолекулярной жидкости из эксплуатационной среды можно оценить по следующей формуле [4]:

$$\Sigma\sigma_{\delta} = \varepsilon \cdot E,$$

где σ_0 – диффузионные остаточные напряжения, МПа; ε – относительное изменение геометрического размера покрытия вследствие сорбции низкомолекулярной жидкости.

Для покрытий на основе исходных и функционально модифицированных ФАЭД выдержанных в модельных эксплуатационных жидких средах (вода, уайт-спирит) при температуре 20 °С следует учитывать неблагоприятную роль диффузионных остаточных напряжений, возникающих вследствие сорбции молекул жидкости и также противодействующих межмолекулярных сил (табл 2,3).

Массопоглощение эксплуатационных сред определялось по стандартным лабораторным методикам [5]. Количество параллельных измерений не менее 3.

Таблица 2 – Диффузионные остаточные напряжения в покрытии при экспозиции в воде

Материал	Поглощение (%) через			$\Sigma\sigma_0$ (МПа) через		
	10 сут	30 сут	90 сут	10 сут	30 сут	90 сут
ФАЭД-50(20)+ПЭПА	0,05	0,10	0,10	1,3	2,4	2,5
ФАЭД-50(20)+АФ-2	0	0,05	0,07	0	1,1	1,3
ФАЭД-50(20)+КУС+ПЭПА	0,04	0,07	0,10	1,2	2,1	2,6
ФАЭД-50(20)+КУС+АФ-2	0	0,03	0,05	0	0,9	1,0
ФАЭД-50(20)+БН+ПЭПА	0,03	0,06	0,08	0,8	0,9	1,0
ФАЭД-50(20)+БН+АФ-2	0	0,02	0,04	0	0,4	0,7
ФАЭД-50(20)+ГС+ПЭПА	0,05	0,08	0,12	0,6	1,8	2,6
ФАЭД-50(20)+ГС+АФ-2	0,01	0,07	0,10	0,3	1,5	2,3
ФАЭД-50(20)+НПИБ+ПЭПА	0,02	0,04	0,08	0,4	1,3	2,0
ФАЭД-50(20)+НПИБ+АФ-2	0	0,02	0,05	0	0,7	1,1

Таблица 3 – Диффузионные остаточные напряжения в покрытии при экспозиции в уайт-спирите

Материал	Поглощение (%) через			$\Sigma\sigma_0$ (МПа) через		
	10 сут	30 сут	90 сут	10 сут	30 сут	90 сут
ФАЭД-50(20)+ПЭПА	0,5	1,0	1,1	1,8	2,3	2,5
ФАЭД-50(20)+АФ-2	0,2	0,7	0,9	1,2	1,8	2,0
ФАЭД-50(20)+КУС+ПЭПА	0,6	1,2	1,4	1,8	2,2	2,4
ФАЭД-50(20)+КУС+АФ-2	0,4	0,9	1,1	1,5	1,9	2,1
ФАЭД-50(20)+БН+ПЭПА	0,4	0,7	0,9	1,3	1,7	2,0
ФАЭД-50(20)+БН+АФ-2	0,2	0,6	0,8	1,0	1,6	2,1
ФАЭД-50(20)+ГС+ПЭПА	0,5	0,9	1,1	1,7	2,0	2,2
ФАЭД-50(20)+ГС+АФ-2	0,3	0,7	0,9	1,2	1,6	1,9
ФАЭД-50(20)+НПИБ+ПЭПА	0,6	0,9	1,4	1,9	2,0	2,5
ФАЭД-50(20)+НПИБ+АФ-2	0,4	0,7	1,0	1,4	1,8	2,2

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 2–3, свидетельствует о том, что разработанные фурано-эпоксидные композиции в процессе эксплуатации в водных и нефтесодержащих средах обладают невысоким уровнем диффузионных остаточных напряжений (до 2,5 МПа). Этот параметр значительно меньше адгезионной и

когезионной прочности покрытий на основе ФАЭД к металлическим и бетонным субстратам.

Таким образом, разработанные защитные системы на основе функционально модифицированных фурано-эпоксидных материалов с адгезионным подслоем обладают достаточно высоким уровнем работоспособности и могут быть использованы для антикоррозионной защиты металлических и бетонных изделий.

Литература

1. Селяев В.П., Низина Т.А., Лазарев А.Л., Ланкина Ю.А., Цыганов В.В. Функционально-градиентные покрытия на основе полимерных связующих // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 7. – С.36 – 40.
2. Селяев В.П., Карташов В.А., Клементьев В.Д. и др. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Мордов. ГУ, 2005. – 160 с.
3. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина.–М.: Химия, 1976.– 415 с.
4. Миненков Б.В., Стасенко И.В. Прочность деталей из пластмасс.– М.: Машиностроение, 1977.– 264 с.
5. Горловский И.А., Индейкин Е.А., Толмачев И.А. Лабораторный практикум по пигментам и лакокрасочным материалам: Учеб. пособие для вузов.– Л.: Химия, 1990.– 240 с.

УДК 678.5

Рассоха О.М., Черкашина Г.М.

ВПЛИВ НАПРУГ ЗСУВУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

В роботі наведені данні, що характеризують вплив структури фурано-епоксидних покриттів на металевих та бетонних поверхнях, а також природи експлуатаційних середовищ на роботоздатність захисних антикорозійних систем.