

ISSN 2091-5527

№ 2/2026

Ўзбекистон

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Ўзбекский научно-технический и производственный журнал

Композиционные материалы

УДК 66.082.2

ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРОЦЕССА ВСПУЧИВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ахмеджанов Юсуф Аббасович, Махмудова Наима Халиловна

Ташкентский государственный технический университет

Аннотация. Статья посвящена исследованию процессов вспучивания, происходящих при действии температурного поля на композиционный полимерный материал - эпоксидную смолу, наполненную газообразующими частицами полифосфата аммония. Дан анализ физико- химических констант, необходимых для постановки краевых задач.

Ключевые слова: вспучивание, газообразователь, полимерный материал, реакция взаимодействия, подложка, связка.

Введение. Вспучивающиеся огнезащитные покрытия представляют интерес для строительной индустрии, машиностроения, транспорта, поскольку основные характеристики используемых материалов практически не ухудшаются. Проблема исследования процессов вспучивания является достаточно актуальной, так как эти материалы обладают хорошими свойствами для защиты от огневого и теплового воздействия. Эффективное использование таких материалов невозможно без комплексного исследования взаимосвязанных физико-химических процессов. С целью получения определенной структуры пузырьков полимерный материал наполняется равномерно расположенными частицами газообразователя с характерными размерами - 50... 100 мкм [1]. Среднее расстояние между центрами частиц газообразователя 120 мкм. Степень наполнения полимерного материала составляет 10%. Толщина полимерного покрытия равна 3 мм.

Предположим, что частицы газообразователя имеют одинаковые размеры и шарообразную форму. Вспучивающийся материал приклеен к подложке. В качестве подложки будем рассматривать дерево, сталь и кирпич. Подложку считаем инертной, не участвующей в процессе вспучивания. Нагрев материала осуществляется таким образом, что процесс можно считать одномерным. Введем систему координат. Пусть ось Oz проходит через центры вертикального слоя частиц газообразователя. До тех пор, пока частицы газообразователя не прогреются до определенной температуры, в материале не

происходит никаких химических превращений, и уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где $a_i = \frac{\lambda_i}{c_i p_i}$; $i=1 \dots 5$; λ_i , c_i , p_i - соответственно

теплопроводность, теплоемкость, плотность материала. На поверхности материала ($z = 0$) выполняется условие

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = a(T_1 - T_s), \quad (2)$$

где T_1 - температура связки; T_s - температура среды; a - коэффициент теплоотдачи между эпоксидной смолой и воздухом.

Будем считать, что контакт между частицами газообразователя связкой - идеальный, поэтому на стыке газообразователя и связки выполняется условие

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (3)$$

где T_2 - температура газообразователя.

На и стыке вспенивающегося материала и подложки выполняется условие

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (4)$$

где T_3 - температура подложки.

В табл. 1 приведены теплофизические константы связки, газообразователя и подложки [2].

Таблица 1

Вещество	Плотность ρ_i , кг/м ³	Теплоёмкость c_j , кДж/кг К	Теплопроводность λ_i , Вт/м К	Индекс i
Эпоксидная смола	1200	0,03	0,24	1
Полифосфат аммония	1600	0,09	0,30	2
Дерево	700	1,75	0,21	3
Сталь	7800	0,46	45,41	4
Кирпич	1800	1,31	0,81	5

Процесс деструкции газообразователя начинается при температуре 400° С и

осуществляется в результате протекания следующих обратимых реакций [3]:

- 1) $2\text{HO}[-\text{NH}_4\text{PO}_3]_{-n}\text{H} \leftrightarrow \text{HO}[-\text{NH}_4\text{PO}_3]_{-2n}\text{H} + 2\text{H}_2\text{O} - Q_1,$
- 2) $[-\text{NH}_4\text{PO}_3]_{-n} \leftrightarrow \text{HO}[-\text{HPO}_3]_{-n} + n\text{NH}_3 - Q_2.$

Образовавшиеся аммиак и пары воды диффундируют к поверхности пузыря. В отношении метафосфорной кислоты предполагаем, что оттекающими газообразными веществами она разбивается на капли и уносится к поверхности пузыря.

На поверхности пузыря рассматриваем следующие необратимые реакции взаимодействия метафосфорной кислоты с функциональными группами связи:

- 3) $[-\text{HPO}_3]_{-n} + n[-\text{CH}_2-] \rightarrow [-\text{H}_3\text{PO}_3]_{-n} + [-\text{C}]_{-n} + Q_3,$
- 4) $[-\text{HPO}_3]_{-n} + -\text{HN}-\text{CH}_2- \rightarrow [-\text{NH}_4\text{PO}_3]_{-n} + [-\text{C}]_{-n} + Q_4,$
- 5) $[-\text{HPO}_3]_{-n} + [\text{CH}_2]_{-n} \rightarrow [-\text{H}_3\text{PO}_4]_{-n} + [-\text{C}]_{-n} + Q_5.$

Эти реакции приводят к образованию углерода.

На поверхности пузыря также проходят обратимые реакции:

- 6) $[-\text{H}_3\text{PO}_3]_{-n} \leftrightarrow [-\text{HPO}_2]_{-n} + n\text{H}_2\text{O} - Q_6,$
 - 7) $[-\text{H}_3\text{PO}_4]_{-n} \leftrightarrow [-\text{HPO}_3]_{-n} + n\text{H}_2\text{O} - Q_7,$
- а также реакции 1) и 2).

Кроме того, учитываем одну обратимую реакцию, протекающую в объеме пузыря:

- 8) $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4\text{OH} + Q_8.$

С учётом химических реакций записываются уравнение для изменения массы газообразных веществ в объеме пузыря

$$\frac{dm}{dt} = S_1 \sum_i \dot{m}_i + S_2 \sum_j \dot{m}_j$$

и уравнение, полученное на основе закона сохранения энергии,

$$\frac{d}{dt} mc_v T = S_1 \sum_i m_i Q_i + S_2 \sum_i m_i Q_i + m_8^{np} Q_8 - m_8^{op} Q_8 - S_2 P_n V_n,$$

где m_i - приход массы газообразных веществ с единицы поверхности газообразователя; m_j - приход массы газообразных веществ с единицы внутренней поверхности пузыря; m_8 - изменение массы газообразных веществ за счет реакции (8), протекающей в объеме пузыря; Q_i - теплота, необходимая для протекания i -й химической реакции ($i = 1, \dots, 8$); S_1 - площадь поверхности газообразователя; S_2 - площадь внутренней

поверхности пузыря; c_v - изохорная теплоемкость смеси газообразных веществ.

c_v является функцией концентраций a_i :

$$c_v = \sum_{i=1}^4 c_{vi} a_i,$$

где c_{vi} - изохорная теплоемкость z -го газообразного вещества, значения c_{vi} приведены в таблице 3 [4-6]; v_p - скорость раздвижения связки под действием давления P_n .

Для нахождения m_i ($i = 1, \dots, 8$) необходимо знать скорости химических реакций.

Предполагаем, что скорость протекания прямой химической реакции удовлетворяет закону Аррениуса [7]:

$$K_{np}(T) = ke^{\frac{E}{RT}},$$

где k , E - константы, а для обратных реакций скорость протекания реакций зависит от константы равновесия [7], причём

$$\frac{K_{np}(T)}{K_{op}(T)} = K_p(T).$$

В табл. 2 приведены значения энергии активации, теплоты реакции, предэкспоненциального множителя и константы равновесия для каждой реакции.

Для расчёта скорости v_n используем уравнение Рэлея:

$$r \frac{dv_n}{dt} = -\frac{3}{2} v_n^2 + \frac{P_{ce} - P_{oc}}{P_{ce}};$$

$$\frac{dr}{dt} = u + v_n;$$

$$P_{ce} = P_n - \frac{2\sigma}{r},$$

где P_{ce} - давление в связке на границе с пузырем; ρ_{ce} - плотность материала связки; P_{oc} - давление в связке вдали от пузыря, равно 1 атм; σ - величина поверхностного натяжения пузыря, равно $(3 \cdot 10^5)$ Н/м² [8]; v_n - скорость изменения размеров пузыря за счет реакций, протекающих на внутренней поверхности пузыря.

Таблица 2

№ реакции	Энергия активации E, кДж/моль	Теплота реакции Q кДж/моль	Предэкспоненциальный множитель k, моль/(м ³ с)	Константа равновесия k _p
1	30,5	24,8	10 ³	2
2	143	137,3	10 ¹¹	3
3	200	154,4	10 ¹³	-
4	162	193,4	10 ¹⁴	-
5	181	174,8	10 ¹²	-
6	91	85,3	10 ⁷	-
7	113	107,3	10 ⁸	-
8	80	73,8	10 ⁶	1,2...1,4

Давление газов в пузыре P находится по формуле Менделеева-Клапейрона:

$$P_n = \rho RT, \tag{8}$$

где R - газовая постоянная смеси газообразных веществ; R является функцией концентраций a_i :

$$R = \sum_{i=1}^4 R_i \alpha_i,$$

где R_i - газовая постоянная i -го газообразного вещества (значения R_i приведены в таблице 3 [4-6]).

Концентрации a_i , ($i=1, \dots, 4$) газообразных веществ (аммиака, паров воды,

метафосфорной кислоты и гидроксида аммония) находятся из уравнения диффузии:

$$\frac{\partial a_i \rho}{\partial t} = \frac{1}{r^2} i \frac{\partial}{\partial r} r^2 D_i \rho \frac{\partial a}{\partial r} - \frac{\rho}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 a_i v_z + m_i; \quad (9)$$

$$z = 1, \dots, 4,$$

где D_i - коэффициенты диффузии.

В табл. 3 приведены значения коэффициентов диффузии D_i [9].

Таблица 3

Константы, характеризующие теплофизические свойства газообразных веществ

Вещество	Коэффициенты диффузии D_i , $\text{см}^2/\text{с}$	Изохорная теплоемкость c_{vi} $\text{кДж}/(\text{кгК})$	Газовая постоянная R_i $\text{Дж}/(\text{кг К})$	Индекс i
Аммиак	0,23	2,5	488	1
Инда	0,26	2,1	461	2
Метафосфорная кислота	0,30	6,9	1750	3
Гидроксид аммония	0,30 ... 0,40	5,4	1270	4

Уравнения (5-9) используются для расчета параметров газообразных веществ в пузыре давления, температуры, плотности, концентрации и скорости движения газов и его радиуса.

В каждом слое увеличение расстояния h между центрами частиц газообразователя (вдоль оси O_z) происходит со скоростью

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\pi r^2 v_n}{a^2},$$

где a - расстояние между центрами частиц газообразователя, a скорость роста всей толщины покрытия H равна:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\pi}{a^2} \sum_{i=1}^N (r^2 v_n) i, \quad (10)$$

где N - число слоев частиц газообразователя.

Выводы: с учётом обратимых и необратимых реакций, протекающие в объеме пузыря выведено уравнение для изменения массы газообразных веществ в объеме пузыря. Приведены значения энергии активации, теплоты реакции, предэкспоненциального множителя и константы равновесия для каждой реакции. Выведены уравнения для расчета параметров газообразных веществ в пузыре давления, температуры, плотности, концентрации и скорости движения газов и его радиуса, а также физико-химические константы уравнений математической физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуклин С.Г., Кодолов В.И., Ларионов К.И., Тюрин С.А. Физико-химические процессы в модифицированных двухслойных огне и теплозащитных наполненных эпоксиполимерах при воздействии на них огневых источников. Физика горения и взрыва. -1995. - № 2. -С. 73-79.
2. Березовский А.И., Маладыка И.Г. Определение коэффициента вспучивания и прочностных характеристик вспученного слоя огнезащитных вибростойких покрытий для противопожарной защиты металлических элементов и конструкций. Журнал Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, № 1(17), 2013.
3. Шукшин С.Г., Клименко Е.Н., Кодолов В.И. Разработка огнезащитных вспучивающихся покрытий модели процессов протекающих в них. Химическая физика и мезоскопия. Том 3, №2. С. 113-125.
4. Кожевников И.Г, Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1982. -328 с.
5. Понамарёва А.М., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. -9-е изд., перераб. - СПб: «Иван Фёдоров», 2003.-240 с.
6. Таблица теплопроводности и теплоемкости материалов онлайн. <https://poweredhouse.ru/tablica-terploprovodnosti-i-teploemkosti-materialov/>
7. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. -М.: Наука, 1987. -490 с.
8. Колюков В.Л., Богатырева Е.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Часть 1 Техническая термодинамика. Учебное пособие. учреждение высш. образования «Керч. гос. мор. технолог. ун-т», - Керчь, 2022 139 с.
9. Петров А. И. Техническая термодинамика и теплопередача. Учебник.-2-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2023. - 428 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Химия и физикохимия композиционных материалов и нанокomпозитов

- Негматов С.С., Абед Н.С., Талипов Н.Х., Салимова С.А., Панжиев О.Х., Икрамова М.Э.** Исследование физико-химико-механических и технологических свойств выбранных минеральных ингредиентов их совместимость с водорастворимым полимером и структурирование в системе цемент-микрокремнезем и разработка эффективных составов композиционных тампонажных материалов на их основе..... 3
- Касимова М.Н., Негматова К.С., Икрамова М.Э., Бабаджанова М.А., Лапасова Ф.А.** Исследование свойств композиционных красителей на основе солей поливалентных металлов, применяемых для крашения природных волокон и тканей на их основе 9
- Негматов С.С., Хурсанов А.Х., Негматов Ж.Н., Абед Н.С., Икрамова М.Э., Рахимов Х.Ю., Курбонов У.М., Бозоров Д.** Разработка инновационной технологии получения композиционных химических флотореагентов – вспенивателей на основе органоминеральных ингредиентов с использованием местного сырья и отходов производств для извлечения цветных, редких и благородных металлов из пульпы медно-молибденовой руды 13
- Mengliyeva A.N., Kamalova D.I., Sultonov S.O’.** Polimer kompozit materiallar tuzilishining mexanik xossalarga asosiy ta’siri 15
- Inog’omov S.Y., Asrorov U.A.** Natriy-karboksimetiltsetillyuloza va poliakrilamid asosida olingan interpolimer kompleksini reologik xossalari o’rganish 19
- Bobonazarova S.H.** 2-xlor-n-tolilatsetamidlarining 8-oksixinolin alkaloidi bilan nukleofil almashinish reaksiyalari 25
- Амонова М.М., Рашитова Ш.Ш.** Термик фаоллаштирилган сапропель асосидаги сорбентларининг физик-кимёвий ва адсорбцион хусусиятлари 27
- Mamirov A.M., Olimov L.O.** Tarkibiga ishqoriy metall atomlari kiritilgan granullangan kremniy kompozit nanozarralari mikrotuzilmasi va morfologiyasi 30
- Сидрасулиева Г.Б., Айтмуратова А.Е., Муяссарова Р.И., Есиркепова В. К., Нурымбетова М.Т., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И.** Синтез и фотокаталитические свойства нанокomпозита O-g-C₃N₅/ZnO 33
- Негматов Ж.Н., Хурсанов А.Х., Негматов С.С., Бозоров Д., Курбонов У.М., Негматова К.С., Абед Н.С., Рахимов Х.Ю., Эрнийёзов Н.Б., Бозоров А.Н.** Композиционные химические флотореагент-вспениватель для извлечения цветных и благородных металлов в процессе флотации из пульпы медно-молибденовых руд 36
- Каримова Г.Ш., Гафуров Д.Н., Бозорова Н.Х.** Нанокomпозиты, полученные на основе полимеров и слоистых силикатов 39

2. Физико-механика и трибология композиционных материалов

- Абед Н.С., Негматов С.С., Бухаров С.Н., Сергиенко В.П., Косимов Ш.Б., Туляганова В.С., Бозоров А.Н., Шамсиева С.С., Эшкobilов О.Х., Джабаров Б.Т.** Исследование трибозлектрических процессов в полимерных покрытиях при взаимодействии с хлопком-сырцом 42
- Косимов Ш.Б., Абед Н.С., Негматов Ж.Н.** Исследование работоспособности и долговечности созданных деталей рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов из антифрикционных и антифрикционно-износостойких полипропиленовых композиционных материалов.. 45
- Хаминов Б.Т.** Ультрадисперс титан карбид билан модификацияланган вольфрам карбид кобальтти қаттиқ қотишма бармоқларини руда майдалаш цехларида эксплуатацион шароитда апробациядан ўтказиш 47
- Tursunbayev S.A., To’raho’jaeva A.N. Rizayeva N.M., Mahmudov F.M., Nurdinov Z.B.** Alyuminiy qotishmalarining suyuqoquvchanliligiga titan elementining ta’siri 49
- Ахмеджанов Ю.А., Махмудова Н.Х.** Определяющие соотношения процесса вспучивания композиционных материалов 51