

УДК 621.763:544.022.84

КИНЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НАБУХАНИЯ И РАСТВОРЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

²Бобрышев А.Н., ¹Ерофеев В.Т., ¹Воронов П.В., ²Бобрышев А.А.,
²Гаврилов М.А., ¹Барменков А.С.

¹ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», Саранск,
e-mail: alexei_13@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
Пенза, e-mail: gavrilov79@inbox.ru

Статья посвящена исследованиям кинетических режимов набухания и растворения композитов в агрессивных средах. Представлен общий механизм набухания композитных материалов, рассматриваются различные режимы взаимодействия композита с агрессивными средами. Представлены графические зависимости, подробно описанные методами математического моделирования с получением функциональных зависимостей, с высокой точностью описывающих изменение исследуемых параметров. Выявлены экстремальные значения функций кинетических режимов в зависимости от исследуемого материала, вида и степени агрессивности среды, ее воздействия от времени. Экспериментально доказано и теоретически обосновано наличие кинетических зависимостей набухания и растворения композитов в агрессивных средах от механизма разрушения твердого тела, что существенно повышает эффективность кинетических прогнозов в оценке стационарных показателей структуры и свойств материалов и конструкций.

Ключевые слова: кинетические режимы, проницаемость, набухание, растворение, «обратный овершут», «ложный старт», разгонная стадия, аттрактант, стробоскопическое отображение, кинетические трансформации

KINETIC MODES OF SWELLING AND DISSOLUTION OF COMPOSITES

²Bobryshev A.N., ¹Erofeev V.T., ¹Voronov P.V., ²Bobryshev A.A.,
²Gavrilov M.A., ¹Barmenkov A.S.

¹Mordovian State University of N.P. Ogarev, Saransk, e-mail: alexei_13@mail.ru;

²Penza State University of Architecture and Construction, Penza, e-mail: gavrilov79@inbox.ru

The article is devoted to the kinetic studies of the modes of swelling and dissolution of composites in aggressive environments. The paper presents the General mechanism of swelling of composite materials, discusses the different modes of interaction of the composite with aggressive media. The graphic dependence described in detail by methods of mathematical modeling with the obtaining of functional dependencies with a high accuracy describes the change of the investigated parameters. Identified extreme values of functions of the kinetic regimes depending on the test material, the type and degree of aggressiveness of the environment, its impact from time to time. It has been experimentally proven and theoretically justified the existence of kinetic dependences of swelling and dissolution of composites in aggressive environments from the mechanism of destruction of a rigid body, which significantly increases the efficiency of the kinetic predictions in the evaluation of the stationary characteristics of the structure and properties of materials and structures.

Keywords: kinetic regimes, permeability, swelling, dissolution, «reverse overshoot», false start, acceleration stage, the attractant, the stroboscopic map, the kinetic of transformation

При взаимодействии композитов с агрессивными средами могут наблюдаться несколько типичных кинетических режимов (рис. 1), связанных с одновременным проявлением набухания и растворения [2, 4, 5, 11, 15]. Проницаемость для агрессивных сред дисперсно-наполненных композитных материалов, сопровождающаяся набуханием и растворением, является одним из важнейших эксплуатационных показателей [1]. Механизм набухания не поддается всестороннему анализу с позиции простых соображений. В общем случае он включает адсорбацию молекул среды на поверхности композита, диффузию среды в объем материала, физико-химические воздействия среды с матрицей и наполнителем, отвод продукции реакции от поверхности взаи-

модействия, образование из продуктов реакции слоя, препятствующего конвективному транспорту среды в объем композита [1, 6–9, 13, 14, 16–19, 21, 22].

К первому из кинетических режимов (рис. 1, а) относится режим монотонного приближения параметра к стационарному значению g_m , связанному с ограниченным набуханием композитного материала, при котором преимущественно осуществляется физическое взаимодействие среды с материалом.

В начальный период ограниченного набухания среда интенсивно проникает в композит через поверхностные трещины, поры и другие дефекты. В этом случае количество массы g , протифундировавшей в композит среды, асимптотически стабилизируется на некотором значении g_m . С течением

времени величина g_m остается неизменной. Рассматриваемый кинетический режим в общем случае описывается следующим уравнением:

$$g = g_m (1 - e^{-kt^n}), \quad (1)$$

где n – постоянный эмпирический коэффициент.

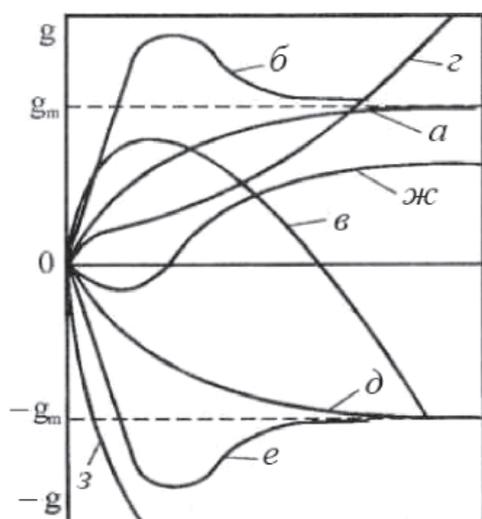


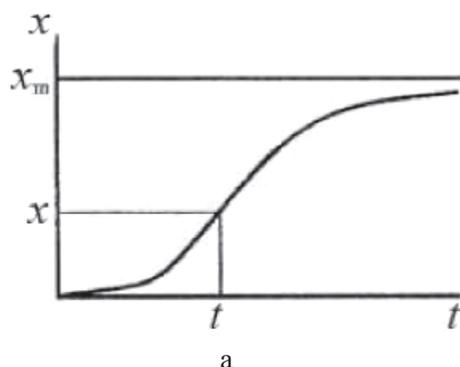
Рис. 1. Кинетические режимы взаимодействия композитных материалов с агрессивными средами (пояснения в тексте)

Для характерной кинетической кривой, проиллюстрированной на рис. 2, а, эмпирический коэффициент имеет значения $n > 1$, тогда как для кривой, изображенной на рис. 2, б, – $n < 1$.

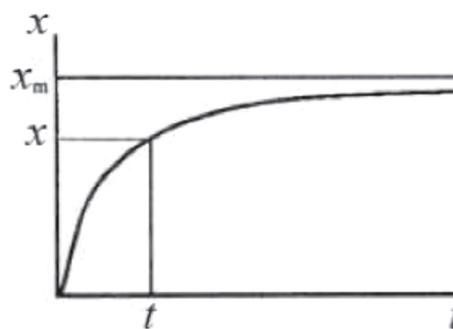
Данные экспериментов часто приводят к зависимостям типа «прямой овершут» (рис. 1, б) с кинетикой, отображаемой зависимостью

$$g = g_m [1 - |1 - r_1|^t e^{i\pi(2t+1)}], \quad (2)$$

где $2 > r_1 > 1$ – параметр роста процесса.



а



б

Рис. 2. Типичные кинетические закономерности изменения физико-механических характеристик

Здесь механизм процесса непосредственно определяется последовательностью проявления эффектов набухания и растворения. В начальный период экспозиции композита в среде за малый промежуток времени прирост массы g , обусловленный диффузионным проникновением среды в материал, резко увеличивается и превышает асимптотический предел g_m . Затем происходит последовательное снижение ее величины до стационарного значения g_m . Отличительной особенностью таких процессов является то обстоятельство, что приближение к асимптоте g_m осуществляется «сверху», в результате понижения параметра g (рис. 3).

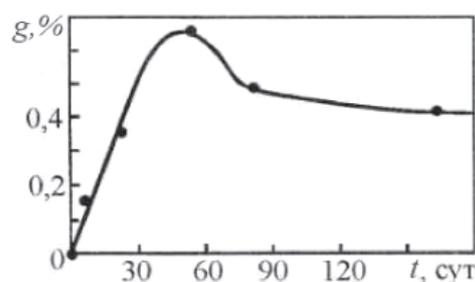


Рис. 3. Режим набухания «прямой овершут» эпоксидного композита (отвердитель 3-диметиламинопропанол) в 30% растворе едкого натра [12]

Снижение g в процессе набухания определяется ограниченной деструкцией и вымыванием дефектных поверхностных слоев материала, что обусловлено физико-химическим взаимодействием со средой. Подобный режим с высоким параметром роста – $r_1 > 1$ свидетельствует о малой пригодности материалов и конструкций на их основе для эксплуатации в подобных условиях.

Набухание с растворением («неограниченное набухание») определяется последовательностью процессов ограниченного набухания и неограниченного растворения (рис. 1, в и 4). Режим считается неприемлемым для технических материалов.

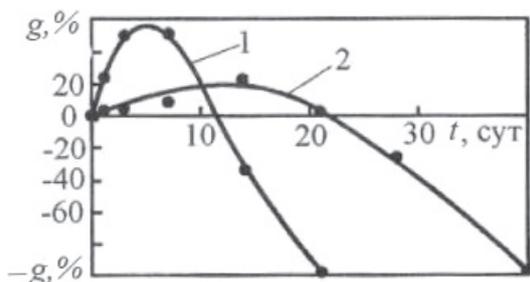


Рис. 4. Режим неограниченного набухания эпоксидного композита (отвердитель ПО-300) в концентрированных кислотах [20]: 1 – серная; 2 – азотная

Разгонное набухание (рис. 1, г и 5) наблюдается в том случае, когда диффузия среды в объеме композитного материала доминирует и не ограничена, а процессы растворения и деструкций активизируются с запозданием.

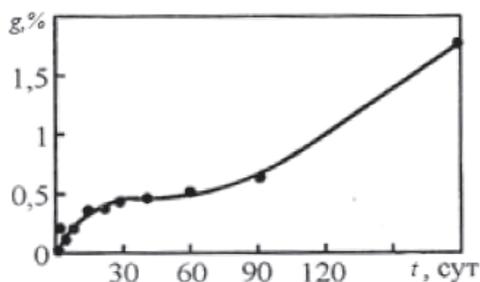


Рис. 5. Режим разгонного набухания эпоксидного композита (отвердитель ПЭПА) в 20% растворе едкого натра [20]

Кинетика массопоглощения при разгонном набухании композитного материала выражается уравнением (2) при $r_1 > 2$, а сам режим не соответствует условиям длительной эксплуатации композитного материала.

Режим ограниченного растворения (рис. 1, б и 6, а) противоположен режиму ограниченного набухания (см. рис. 1, а) и описывается зависимостью

$$g = -g_m [1 - e^{-kt^n}]. \quad (3)$$

При поверхностном растворении, когда величина стационарного значения $-g_m$ незначительна, режим может быть принят за рабочий.

Режим разгонного растворения (рис. 1, ж и 6, б) характеризует композитный материал как абсолютно нестойкий в условиях действия среды.

Проявление режима «обратный овершут» (рис. 1, е и 7, а) связано с быстрым поверхностным растворением и последующим ограниченным набуханием. При этом первый процесс преобладает над вторым и поэтому параметр g остается в области от-

рицательных значений. Такой режим определяется кинетикой

$$g = -g_m [1 - |1 - r_1|^t e^{i\pi(2t+1)}] \quad (4)$$

и также может быть использован в качестве рабочего.

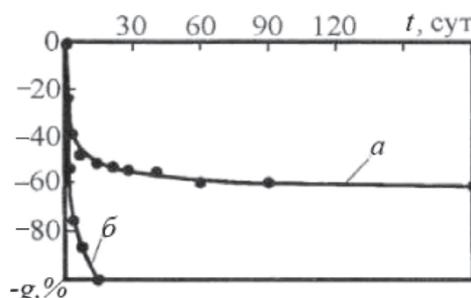


Рис. 6. Режимы ограниченного растворения (отвердитель ПЭПА) (а) и разгонного растворения (отвердитель 3-диметиламинопропанол) (б) эпоксидного композита в концентрированной серной кислоте [12]

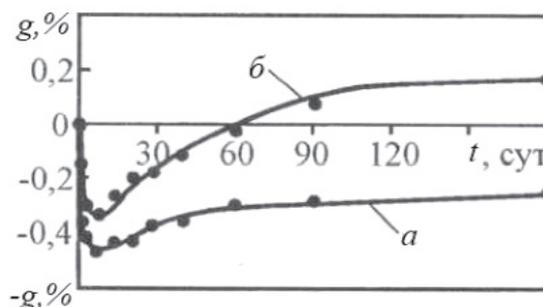


Рис. 7. Режимы «обратный овершут» (а) и «ложный старт» (б) для эпоксидного композита (отвердитель АФ-2) [20]. Композиты экспонировались в воде (а) и в концентрированной соляной кислоте (б)

Наиболее предпочтителен в условиях эксплуатации режим «ложного старта» (рис. 1, з и 7, б), который является результатом сращивания асимптотик растворения и набухания, протекающих одновременно. Здесь подрастворение наружных дефектных слоев способствует кальматированию поверхностных пор и микротрещин продуктами деструкций, тем самым создавая барьер для дальнейшего диффузионного проникновения среды в массив материала. В результате эффективное набухание может значительно снижаться в сравнении с монотонной кинетикой (см. рис. 1, а).

Рассмотрим кинетические зависимости, которые имеют вид кривых (рис. 8, с). В этом случае параметр x в начале процесса принимает отрицательные значения, но в дальнейшем монотонно увеличивается.

Процесс вновь проходит через стартовое значение параметра $x = 0$ (при $t = t_2$), после чего следует приближение к аттрактору x_m . В данной ситуации реализуется сценарий «ложного старта», когда начало роста параметра $x > 0$ смещается по временной оси в точку $t = t_2, x = 0$ (рис. 8, с).

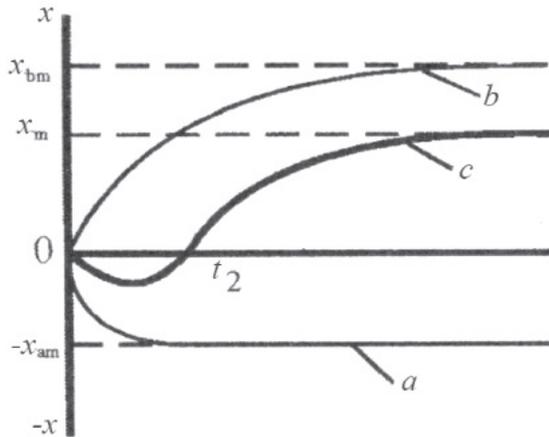


Рис. 8. Кинетические зависимости режима «ложный старт»

Подобный эффект имеет непротиворечивую интерпретацию при использовании модели сращивания асимптотик [15].

Пусть в системе одновременно наблюдается протекание двух конкурирующих процессов, один из которых дает асимптоту (рис. 8, а) в области отрицательных значений параметра x :

$$x_a = -x_{am} [1 - \exp(-k_a t^n)], \quad (5)$$

другой связан с монотонным изменением x в области положительных величин (рис. 8, в):

$$x_b = x_{bm} [1 - \exp(-k_b t^n)]. \quad (6)$$

Очевидно, что эффективный процесс описывается зависимостью [1]:

$$x_c = x_a + x_b = x_m + x_{am} \exp(-k_a t^n) - x_{bm} \exp(-k_b t^n). \quad (7)$$

Если в начале процесса

$$x_m + x_{am} \exp(-k_a t^n) < x_{bm} \exp(-k_b t^n),$$

что определяется условием $k_a \gg k_b$, то эффективная кинетика будет развиваться по сценарию «ложного старта» (рис. 8, с). В данном аспекте интерес представляет время t_2 «ложного старта». Поскольку $k_a \gg k_b$, процесс $x_a = f(t)$ с соответствующей зависимостью (7) протекает гораздо интенсивнее и быстро заканчивается, когда $\exp(-k_a t^n) \rightarrow 0$. «Ложный старт» определяется условием $x_c = 0$. С учетом этого (6) принимает вид

$$x_m - x_{bm} \exp(-k_b t^n) = 0,$$

откуда окончательно получим

$$t_2 = \left[\frac{\ln(x_m/x_{bm})}{k_b} \right]^{1/n}. \quad (8)$$

Когда параметр роста начинает превышать величину $r_t = 2$, происходит бифуркационная смена кинетических режимов, схематически изображенная на рис. 9. В результате режим сходимости к аттрактору x_m сменяется на режимы сходимости к бесконечности.

Произведем анализ возможных кинетических режимов для условия ($r > 2$) расходимости решений параметрического равенства:

$$x = x_m [1 - (Ae^{it})^r], \quad (9)$$

где $A = |i - r_1|$; $(-1) = e^{i\pi}$.

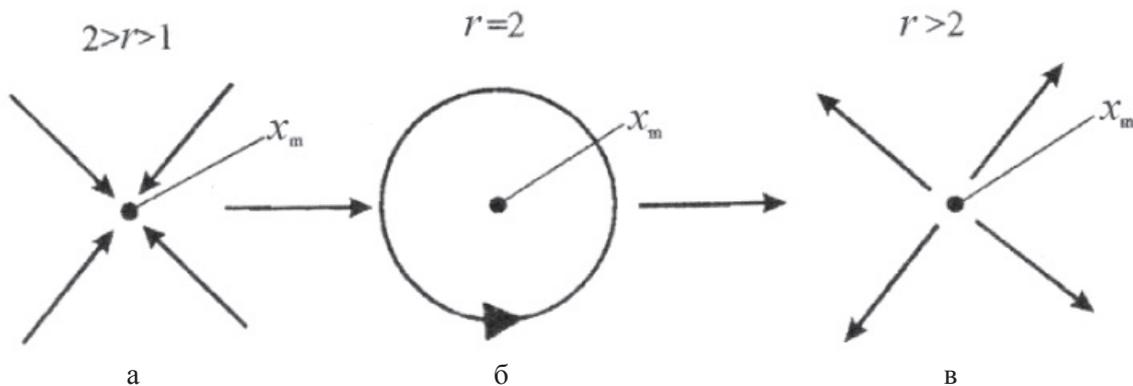


Рис. 9. Схематическое изображение бифуркационной смены кинетических режимов [12]: а – сходимость решений; б – предельный цикл; в – расходимость решений

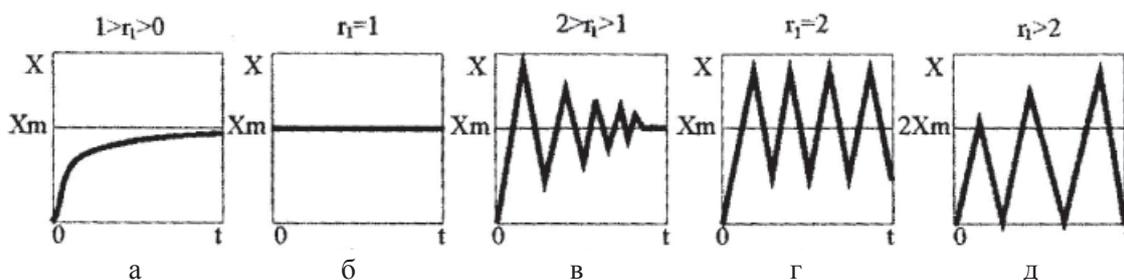


Рис. 10. Зависимости, соответствующие решению уравнения $x = x_m [1 - (1 - r_1)^n]$ [3]

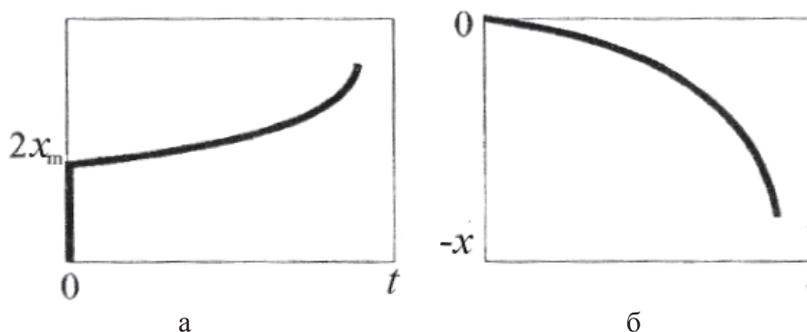


Рис. 11. Стробоскопические отображения эволюционной кривой

Поскольку в практике преимущественно реализуются процессы с плавным изменением изучаемого параметра x , рассмотрим лишь стробоскопические отображения эволюционной зависимости (рис. 10, б), которые описываются параметрическими выражениями

$$x = x_m [1 - A^t e^{2i\pi t}]; \quad (10)$$

$$x = x_m [1 - A^t e^{2i\pi(2t+1)}]. \quad (11)$$

В подобном рассмотрении выделяются два стробоскопических отображения в виде верхней (с нечетными временными интервалами) и нижней (с четными временными интервалами) огибающими [8], характерный вид которых изображен на рис. 11.

Следует отметить, что оба типа зависимостей характеризуют поведение неустойчивых (разгонных) процессов с аттрактором в бесконечности. Так, кривая рис. 11, б отражает процесс активного растворения композита в агрессивной среде, вплоть до полного перехода матричного материала в раствор, когда относительное изменение массы образца непрерывно снижается. Такой процесс, протекающий в режиме стробоскопического отображения с четными временными интервалами (рис. 10, б), является типично разгонным с аттрактором в бесконечности. Для данного примера аттракторным проявлением служит полная деструкция материала

композита в результате растворения матричного связующего. Аналитическое описание кинетики растворения дается уравнением (10) с модулем $A > 1$.

Отдельного рассмотрения заслуживает стробоскопическое отображение с нечетными временными интервалами (рис. 10, б и 11, а), типичное для неограниченной ползучести, протекающей в разгонном режиме. Аттракторное проявление при неограниченной ползучести реализуется в виде разрушения. Здесь параметр x представляется деформацией ползучести ϵ . В этой связи согласно (11) эволюция ползучести описывается зависимостью

$$\epsilon = 0,5\epsilon_s [1 - A^t e^{i\pi(2t+1)}], \quad (12)$$

где ϵ_s – сумма мгновенной упругой деформации и деформации неустановившейся стадии ползучести; $A > 1$ – модуль параметра $(1 - r_1)$ при $r_1 > 2$. Поскольку излагаемые результаты относятся к изучению кинетических процессов с особенностями, ограничимся лишь записью уравнения (12).

В отличие от режима «ложного старта» с первичным ограниченным растворением и последующим ограниченным набуханием, существуют процессы, когда изначально доминирующим является ограниченное набухание, переходящее в разгонное неограниченное растворение. Подобным

образом протекает процесс набухания полимерных композитов в особо агрессивных средах, способных растворять полимерную матрицу.

Вначале, в результате осмотического процесса диффузии среды в массив композита происходит набухание матричного материала, что сопровождается ростом массопоглощения (рис. 12, а). По мере набухания постепенно развивается процесс растворения полимера, который при длительной экспозиции композитного материала в агрессивной среде становится доминирующим (рис. 12, б). При этом масса композита неуклонно понижается. Примечательно, что итоговая стадия процесса является разгонной и заканчивается полной деструкцией материала.

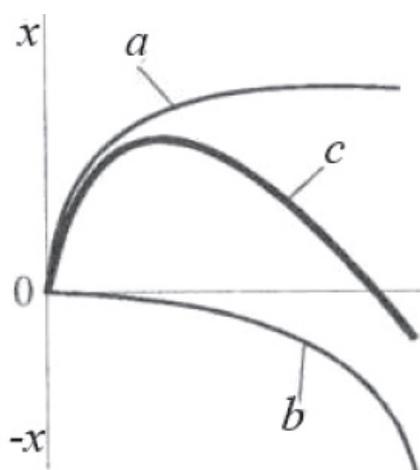


Рис. 12. Кинетика набухания с переходом в растворение

В соответствии с выражениями

$$x = x_m \left[1 - (1 - r_1)^n \right]$$

и

$$x = x_m \left[1 - (1 - r_1)^t \right] \quad (13)$$

кинетика процесса набухания с последующим растворением (рис. 12 с) представляется в виде аддитивного эффекта [6]:

$$x_c = x_a + x_b = x_m (1 - A_a^t) + x_m A_b^t e^{2\pi i t}, \quad (14)$$

где $A_a = (1 - r_a) < 1$; $r_a < 1$ – параметр роста ограниченного набухания; $A_b = |1 - r_b| > 1$, $r_b > 2$ – параметр роста неограниченного растворения.

Проведенное обсуждение линейной модели эволюционных процессов прежде всего обусловлено возможностью рассмотрения тех режимов динамических систем, которые невозможно интерпретировать классическим представлением:

$$x = x_m (1 - e^{-kt}). \quad (15)$$

Особенности, связанные с проявлением стробоскопических отображений, чаще рассматриваются не с позиции единой кинетической модели, а как отдельные эффекты либо наложения процессов, что в целом затрудняет понимание механизма кинетических трансформаций. В этой связи параметр роста r_1 является независимым показателем в оценке сложного поведения систем. Ограниченность уравнения (14) непосредственно связана с узким диапазоном ($1 > r_1 > 0$) изменения величины управляющего параметра r_1 . В свою очередь предложенные параметрические кинетические уравнения (13), включающие параметр роста r_1 как динамическую характеристику, позволяют расширить применимость теоретических решений для класса процессов, у которых $r_1 > 1$, что существенно повышает эффективность кинетических прогнозов в оценке стационарных показателей структуры и свойств материалов и конструкций.

Таким образом, в результате проведенных исследований кинетических режимов набухания и растворения композитов в агрессивных средах представлен общий механизм набухания композитных материалов, рассмотрены различные режимы их взаимодействия с агрессивными средами. Описаны типичные кинетические процессы, протекающие при эксплуатации композитных материалов. Представлены графические зависимости, подробно описанные методами математического моделирования с получением функциональных зависимостей, с высокой точностью описывающих изменение исследуемых параметров. Выявлены экстремальные значения функций кинетических режимов в зависимости от исследуемого материала и действия среды от времени.

Список литературы

1. Бартнев Г.М. Временная зависимость прочностей хрупких тел в поверхностно-активных средах / Г.М. Бартнев, И.В. Разумовская // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 150. – № 4. – С. 784–787.
2. Бобрышев А.Н., Воронов П.В., Шибиков В.Г. и др. Новые модели кинетических процессов структурообразования и деструкций композитных материалов. – М.: Палеотип, 2011. – 164 с.
3. Бобрышев А.Н., Галимов Э.Р., Воронов П.В. и др. Обобщенные модели деформирования и разрушения твердых тел. – Казань: Изд-во Отечество, 2013. – 225 с.
4. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Полимерные композиционные материалы. учеб. пособие. – М.: АСВ, 2013. – 480 с.
5. Бобрышев А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. – СПб.: Наука, 2012. – 474 с.
6. Бокшицкий М.Н. Длительная прочность полимеров. – М.: Химия, 1978. – С. 309.

7. Воробьева П.А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. – М.: Химия, 1978. – С. 816.
8. Воронов П.В., Бобрышев А.Н., Лахно А.В. Топологические особенности кинетических процессов // Безопасность движения поездов: труды IX научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2008. – С. 72–73.
9. Воронов П.В., Туманова Н.Н., Бобрышев А.Н., Лахно А.В. Динамика и кинетика изменения свойств композитных материалов. – Пенза: ПГУАС, 2009. – 127 с.
10. Ерофеев В.Т., Римшин В.И., Смирнов В.Ф. и др. Армированные каркасные композиты для зданий и сооружений / под общ. ред. В.Т. Ерофеева, В.И. Римшина, В.Ф. Смирнова. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.
11. Иорданский А.Л., Маркин В.С., Занков Г.Е. Диффузия электролитов в полимерах. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
12. Кондратьева Е.В. Щелочестойкие эпоксидные композиты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2000. – 189 с.
13. Лахно А.В., Кувшинова О.А., Воронов П.В. Оценка кинетических процессов твердения строительных материалов // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектурно-строит. ун-та. Сер. «Стр-во и архитектура». – 2009. – Вып. 4. – С. 84–89.
14. Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. – Л., 1980. – С. 248.
15. Новиков Е.В., Воронов П.В., Лахно А.В., Бобрышев А.Н. Кинетические процессы в композитах при воздействии агрессивных сред // Междунар. технико-экон. журн. – 2014. – Вып. 6. – С. 95–102.
16. Полак А.Ф. Математическая модель процесса коррозии бетона в жидких средах // Бетон и железобетон. – 1988. – № 3. – С. 30–31.
17. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. и др. Биологическое сопротивление материалов. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 196 с.
18. Соломатов В.И., Селяев В.П., Соколова Ю.А. Химическое сопротивление материалов. Москва: РААСН. – 284 с.
19. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 136.
20. Туманова Н.Н. Анализ кинетических процессов для оценки структуры и свойств композитных строительных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза: 2004. – 189 с.
21. Федорцов А.П. Позитивная коррозия, или коррозия по В.И. Соломатову, и физико-химическое сопротивление бетонов // Успехи строительного материаловедения: материалы юбилейной конференции. – М., 2001. – С. 2014–2018.
22. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967. – 490 с.
3. Bobryshev A.N., Galimov Je.R., Voronov P.V. i dr. Obobshchennye modeli deformirovaniya i razrusheniya tverdyh tel. Kazan: Izd-vo Otechestvo, 2013. 225 p.
4. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.N. Polimernye kompozicionnye materialy. ucheb. posobie. M.: ASV, 2013. 480 p.
5. Bobryshev A.N. Fizika i sinergetika dispersno-neporjadochennyh kondensirovannyh kompozitnyh sistem / A.N. Bobryshev, V.T. Erofeev, V.N. Kozomazov. SPb.: Nauka, 2012. 474 p.
6. Bokshickij M.N. Dlitelnaja prochnost polimerov. M.: Himija, 1978. pp. 309.
7. Vorobeve P.A. Korroziionnaja stojkost materialov v agressivnyh sredah himicheskikh proizvodstv. M.: Himija, 1978. pp. 816.
8. Voronov P.V., Bobryshev A.N., Lahno A.V. Topologicheskie osobennosti kineticheskikh processov // Bezopasnost dvizhenija poezdov: trudy IX nauchno-prakticheskoy konferencii. M.: MIIT, 2008. pp. 72–73.
9. Voronov P.V., Tumanova N.N., Bobryshev A.N., Lahno A.V. Dinamika i kinetika izmeneniya svojstv kompozitnyh materialov. Penza: PGUAC, 2009. 127 p.
10. Erofeev V.T., Rimshin V.I., Smirnov V.F. i dr. Armirovannye karkasnye kompozity dlja zdaniy i sooruzhenij / pod obshh. red. V.T. Erofeeva, V.I. Rimshina, V.F. Smirnova. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2015. 360 p.
11. Iordanskij A.L., Markin V.S., Zankov G.E. Diffuzija jelektrolitov v polimerah. M.: Himija, 1984. 240 p.
12. Kondrateva E.V. Shhelochestojkie jepoksidnye kompozity: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Penza, 2000. 189 p.
13. Lahno A.V., Kuvshinova O.A., Voronov P.V. Ocenka kineticheskikh processov tverdenija stroitelnyh materialov // Nauch. vestn. Voronezh. gos. arhitekturno-stroit. un-ta. Ser. «Str-vo i arhitektura». 2009. Vyp. 4. pp. 84–89.
14. Manin V.N., Gromov A.N. Fiziko-himicheskaja stojkost polimernyh materialov v uslovijah jekspluatacii. L., 1980. pp. 248.
15. Novikov E.V., Voronov P.V., Lahno A.V., Bobryshev A.N. Kineticheskie processy v kompozitah pri vozdejstvii agressivnyh sred // Mezhdunar. tehniko-jekon. zhurn. 2014. Vyp. 6. pp. 95–102.
16. Polak A.F. Matematicheskaja model processa korrozii betona v zhidkikh sredah // Beton i zhelezobeton. 1988. no. 3. pp. 30–31.
17. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F. i dr. Biologicheskoe soprotivlenie materialov. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 2001. 196 p.
18. Solomatov V.I., Seljaev V.P., Sokolova Ju.A. Himicheskoe soprotivlenie materialov. Moskva: RAASN. 284 p.
19. Stepanov R.D., Shlenskij O.F. Raschet na prochnost konstrukcij iz plastmass, rabotajushih v zhidkikh sredah. M.: Mashinostroenie, 1984. pp. 136.
20. Tumanova N.N. Analiz kineticheskikh processov dlja ocenki struktury i svojstv kompozitnyh stroitelnyh materialov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Penza: 2004. 189 p.
21. Fedorcov A.P. Pozitivnaja korrozija, ili korrozija po V.I. Solomatomu, i fiziko-himicheskoe soprotivlenie betonov // Uspеhi stroitel'nogo materialovedeniya: materialy jubilejnoj konferencii. M., 2001. pp. 2014–2018.
22. Frank-Kameneckij D.A. Diffuzija i teploperedacha v himicheskoy kinetike. M.: Nauka, 1967. 490 p.

References

1. Bartenev G.M. Vremennaja zavisimost prochnostej hrupkih tel v poverhnostno-aktivnyh sredah / G.M. Bartenev, I.V. Razumovskaja // Doklady AN SSSR. 1963. T. 150. no. 4. pp. 784–787.
2. Bobryshev A.N., Voronov P.V., Shibakov V.G. i dr. Novye modeli kineticheskikh processov strukturoobrazovaniya i destrukcij kompozitnyh materialov. M.: Paleotip, 2011. 164 p.