

Received: 09.02.2026

Revised: 22.04.2026

Accepted: 22.05.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.139-150

STUDYING THE CURING KINETICS AND MICROSTRUCTURE OF FURAN POLYMER CONCRETE BASED ON FF-1A RESIN

Yu. N. Polina^{a,*} and G. I. Shaidurova^b

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russia

^a  <https://orcid.org/0009-0005-9926-3736>  julia-sun_1982@mail.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0002-5110-7858>  sgi615@iskra.perm.ru

*Corresponding author. Email: julia-sun_1982@mail.ru

Address for correspondence: Komsomolskiy prosp., 29, Perm, 614990, Russia

Tel.: +7 (902) 801-7011

The paper presents the results of a comprehensive study of structure formation in furan polymer concrete based on FF-1A furan resin and an acid hardener. The relevance of the study is due to the increasing use of furan composites as chemically resistant structural materials in aggressive environments, where reliability and durability directly depend on curing kinetics and the features of the formed microstructure. The aim of the study is to establish quantitative relationships among the composition of the mixture, the parameters of polycondensation kinetics, and the final morpho-structural characteristics of the material. The methodological basis includes differential scanning calorimetry for analyzing the kinetics of isothermal and dynamic curing, Fourier transform infrared spectroscopy for monitoring chemical transformations, and scanning electron microscopy for studying micromorphology. It has been found that the curing kinetics is described by the model of an autocatalytic reaction of the n -th order with an effective activation energy of 65–75 kJ/mol. It is shown that the rate of hardener introduction and temperature significantly affect resin conversion and interphase layer porosity. There proves to be a correlation among the degree of completion of the exothermic peak on the DSC curves, the achievement of system vitrification, and the formation of a homogeneous, less porous structure at the binder–filler interface. The optimized curing mode, including stepwise temperature heating, reduces internal stresses and material defectiveness, this being confirmed by an increase in compressive strength by 15–20% and a higher chemical resistance in a 10% sulfuric acid environment. The results of the study are of practical importance for the development of technological regulations for the production of furan polymer concretes with a specified set of operational properties.

Keywords: furan polymer concrete, curing kinetics, structure formation, differential scanning calorimetry, morphology, furan resin, acid hardener, polycondensation, interphase layer, chemical resistance, scanning electron microscopy, activation energy, vitrification

References

1. Tverdokhlebov, D.A., Tarmosin, K.V., and Erofeev, V.T. Furan composites of frame structure. *Vestnik Mordovskogo Universiteta*, 2003, 13 (3–4), 145–152. (In Russian).
2. Aleksandrov, V.B. *Strukturoobrazovanie i svoystva modifitsirovannogo furanovogo polimerbetona* [Structure Formation and Properties of Modified Furan Polymer Concrete: Synopsis of Candidate Thesis]. Saratov, 1994, 17 p. (In Russian).
3. Bormotov, A.N. *Matematicheskoe modelirovanie i mnogokriterialnyi sintez kompozitsionnykh materialov spetsialnogo naznacheniya* [Mathematical Modeling and Multicriteria

Synthesis of Special-Purpose Composite Materials: Doctoral Thesis]. Penza, 2011, 275 p. (In Russian).

4. Moshkin, V.N. *Sostavy i tekhnologiya furanovogo polimerbetona s ispolzovaniem otkhodov nikelevogo proizvodstva* [Compositions and Technology of Furan Polymer Concrete Using Nickel Production Waste: Synopsis of Candidate Thesis]. Saratov, 1990, 15 p. (In Russian).
5. Usoltsev, B.E. *Svoystva i tekhnologiya polucheniya polimerbetonnykh kompozitsiy na osnove furano-epoksidnykh svyazuyushchikh* [The Properties and Technology of Producing Polymer Concrete Compositions Based on Furan-Epoxy Binders: Candidate Thesis]. Moscow, 2001, 304 p. (In Russian).
6. Rassokha, A.N. The influence of formulation and technological factors on the structure and properties of furan-epoxy polymer systems. *Vestnik BGTU*, 2013, 1, 6–9. (In Russian).
7. Lipatov, Yu.S. *Fiziko-khimiya napolnennykh polimerov* [Physical Chemistry of Filled Polymers]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1967, 233 p. (In Russian).
8. Rassokha, A. and Cherkashina, A. Designing low viscosity furan-epoxy polymers of the materials for construction industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, 3, 6 (81), 38–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71266.
9. Rassokha, A.N. Modified furan-epoxy polymer materials for construction purposes. *Vestnik BGTU*, 2012, 4, 44–47. (In Russian).
10. Ivashchenko, Yu.G. *Strukturoobrazovanie, svoystva i tekhnologiya modifitsirovannykh furanovykh kompozitov* [Structure Formation, Properties and Technology of Modified Furan Composites: Doctoral Thesis]. Saratov, 1998, 312 p. (In Russian).
11. Suzdalev, I.P. *Nanotekhnologiya: fiziko-khimiya nanoklastero, nanostruktur i nanomaterialov* [Nanotechnology: Physico-Chemistry of Nanoclusters, Nanostructures and Nanomaterials]. Librokom Publ., Moscow, 2009, 589 p. (In Russian).
12. Bormotov, A.N. Optimization of the polymer matrix of epoxy composites. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal*, 2022, 1-1 (115), 28–33. (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.004.
13. Bormotov, A.N., Proshin, I.A., and Vasilkov, A.V. Theoretical bases of computer modeling of disperse systems structurization. *Vestnik TGTU*, 2011, 17 (2), 542–551. (In Russian).
14. Bormotov, A.N. and Gorokhova, A.A. Mathematical modeling of structure formation of composite materials using dynamic models. *International Research Journal*, 2020, 12 (102), 22–28. (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2020.102.12.004.
15. Kloczkowski, A., Sharaf, M.A., and Mark, J.E. Computer simulations on filled elastomeric materials. *Chemical Engineering Science*, 1994, 49 (17), 2889–2897. DOI: 10.1016/0009-2509(94)E0107-2.
16. Nizina, T.A., Selyaev, V.P., Nizin, D.R., Kanaeva, N.S., and Artamonov, D.A. Kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymers exposed in a temperate continental climate. *Umnye Kompozity v Stroitel'stve*, 2020, 1 (1), 27–35. (In Russian). DOI: 10.52957/27821919_2020_1_27.
17. Bormotov, A.N. and Gorokhova, A.A. Modeling the effect of modifying additives on the rheological parameters of composites. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal*, 2021, 4-1 (106), 51–56. (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.008.
18. Bondarev, B.A., Komarov, P.V., Korneev, O.O., Sychev, A.Yu., Meshcheryakov, A.A., and Nemakhov, I.V. Polymer composite materials of the carcass structure. *The Eurasian Scientific Journal*, 2020, 3 (12). (In Russian). Available at: <https://esj.today/PDF/51SAVN320.pdf>
19. Khasimova, A.S., Morozova, N.N., and Khozin, V.G. Cast concrete based on composite gypsum binder. *Tekhnologii Betonov*, 2015, 3–4 (104–105), 23–25. (In Russian).
20. Jang, K.-S. Mechanics and rheology of basalt fiber-reinforced polycarbonate composites. *Polymer*, 2018, 147, 4, 133–141. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.004.

21. Nizin, D.R., Nizina, T.A., Selyaev, V.P., and Kanaeva, N.S. Reversible and irreversible changes in the properties of polymer materials during full-scale climatic aging. *Umnye Kompozity v Stroitelstve*, 2022, 3 (1), 18–29. (In Russian). DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18.
22. Bobrowski, A., Kaczmarzka, K., Drożyński, D., Woźniak, F., Dereń, M., Grabowska, B., Żymankowska-Kumon, S., Szucki, M. P3D printed (binder jetting) furan molding and core sands—thermal deformation, mechanical and technological properties. *Materials*, 2023, 16 (9), 3339. DOI: 10.3390/ma16093339.
23. Bormotov, A.N. and Gorokhova, A.A. Mathematical model of viscosity of unfilled epoxy resin. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal*, 2020, 4 (94). (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2020.94.4.003.
24. Negmatov, S.S., Abed, N.S., Tukhliev, M.Sh., Bozorbev, Sh.A., Negmatov, Zh.N., Khaminov, B.T., Sultonov, S.U., Imomnazarov, S.K., Makhammadzonov, Kh.A., Yulchieva, S.B., and Mamasoliev, E.M. Investigation of strength and thermophysical properties of developed composite furan-epoxy polymer materials and coatings based on them. *Universum: Tekhnicheskie Nauki: Electron. Nauchn. Zhurn.*, 2023, 7 (112). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15807>
25. Moldamuratov, Zh.N., Imambayeva, R.S., Imambaev, N.S., Igl'kov, A.A., and Tattibayev, S.Zh. Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction. *Nanotechnologies in Construction*, 2022, 14 (4), 306–318. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318.

Подана в журнал: 09.02.2026

УДК 691.342

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.4.139-150

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТВЕРЖДЕНИЯ И МИКРОСТРУКТУРЫ ФУРАНОВОГО ПОЛИМЕРБЕТОНА НА ОСНОВЕ СМОЛЫ ФФ-1А

Ю. Н. Полина^{а, *}, Г. И. Шайдурова^б

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Комсомольский проспект, д. 29, Пермь, 614990, Россия*

^а  <https://orcid.org/0009-0005-9926-3736>  julia-sun_1982@mail.ru;

^б  <https://orcid.org/0000-0002-5110-7858>  sgi615@iskra.perm.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: julia-sun_1982@mail.ru
Адрес для переписки: Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь, 614990, Россия
Тел.: +7 (902) 801-7011

В работе представлены результаты комплексного исследования процессов структурообразования фуранового полимербетона на основе фурановой смолы ФФ-1А и кислотного отвердителя. Актуальность исследования обусловлена расширяющимся применением фурановых композитов в качестве химически стойких конструкционных материалов в условиях агрессивных сред, где надежность и долговечность напрямую зависят от кинетики отверждения и особенностей формируемой микроструктуры. Цель работы – установление количественных зависимостей между составом композиции, параметрами кинетики поликонденсации и конечными морфоструктурными характеристиками материала. Методологическую основу составили методы дифференциальной сканирующей калориметрии для анализа кинетики изотермического и динамического отверждения, инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием для контроля химических превращений, а также сканирующей электронной микроскопии для изучения микроморфологии. Установлено, что кинетика отверждения описывается моделью автокаталитической реакции n -го порядка с эффективной энергией активации 65–75 кДж/моль. Показано, что скорость введения отвердителя и температура существенно влияют на конверсию смолы и пористость межфазного слоя. Выявлена корреляция между степенью завершенности экзотермического пика на ДСК-кривых, достижением витрификации системы и формированием гомогенной, менее пористой структуры на границе раздела «связующее – наполнитель». Оптимизированный режим отверждения, включающий ступенчатый температурный нагрев, позволяет снизить внутренние напряжения и дефектность материала, что подтверждается повышением прочности на сжатие на 15–20 % и химической стойкости в среде 10-процентной серной кислоты. Результаты исследования имеют практическое значение для разработки технологических регламентов производства фурановых полимербетонных изделий с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: фурановый полимербетон, кинетика отверждения, структурообразование, дифференциальная сканирующая калориметрия, морфология, фурановая смола, кислотный отвердитель, поликонденсация, межфазный слой, химическая стойкость, сканирующая электронная микроскопия, энергия активации, витрификация

1. Введение

Фурановые полимербетоны (ФПБ) занимают особое место в классе полимерных композиционных материалов строительного назначения благодаря уникальной стойкости к воздействию широкого спектра агрессивных химических сред, включая кислоты,

щелочи и органические растворители [1, 2]. Их применение для изготовления полов, резервуаров, химической аппаратуры и элементов конструкций, работающих в условиях агрессивных производств (химическая, металлургическая, целлюлозно-бумажная промышленность), экономически и технически обосновано долговечностью и низкой проницаемостью. Основу материала составляет фурановая смола (чаще всего фураноформальдегидная типа ФФ-1А), отверждаемая в присутствии сильных кислотных катализаторов, таких как бензолсульфокислота, толуолсульфокислота или их смеси [3]. Несмотря на длительную историю применения, современное материаловедение фурановых композитов сталкивается с задачей не эмпирического, а целенаправленного проектирования их структуры и свойств. Это связано с ужесточением эксплуатационных требований и необходимостью оптимизации ресурсозатратных технологических процессов. Ключевым фактором, определяющим комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств ФПБ, является формирующаяся в процессе поликонденсации пространственная полимерная сетка и характер ее взаимодействия с минеральным наполнителем (кварцевый песок, щебень). Кинетика отверждения, контролируемая составом, типом отвердителя и температурным режимом, напрямую влияет на степень конверсии функциональных групп, плотность сетки, величину усадочных напряжений и, как следствие, на морфологию и дефектность структуры, особенно в критическом межфазном слое [4, 5]. Современные исследования в области полимерных композитов смещаются в сторону установления количественных связей «состав – технология – структура – свойства». Однако применительно к фурановым системам значительная часть работ носит описательный характер, фокусируясь на конечных свойствах, в то время как процессы морфогенеза, инициируемые на стадии жидкой фазы и предопределяющие будущие эксплуатационные характеристики, изучены недостаточно. Особый дефицит ощущается в исследованиях, совмещающих методы физико-химической кинетики для анализа превращений связующего с прямыми методами анализа микроструктуры (СЭМ, АСМ) формирующегося гетерогенного композита [6, 7]. Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью углубления фундаментальных представлений о механизмах структурообразования ФПБ и разработки научно обоснованных рекомендаций по управлению этим процессом. Целью работы является установление корреляционных зависимостей между кинетическими параметрами отверждения фуранового связующего, условиями проведения процесса и морфологическими особенностями формирующейся структуры полимербетона, определяющими его прочностные и защитные свойства.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Материалы и рецептуры композиций

В качестве связующего использовалась фураноформальдегидная смола марки ФФ-1А (по данным производителя – фурано-формальдегидная смола) с вязкостью 150–250 сПз и содержанием связанного формальдегида 9–11 %. Отвердителем служила 50-процентная водная смесь бензолсульфокислоты (БСК). Минеральный наполнитель – кварцевый песок фракции 0,1–0,6 мм с модулем крупности ($M_{кр}$) 1,8 и гранитный щебень фракции 5–10 мм [8]. Основная рецептура композиций для приготовления фуранового полимербетона представлена в табл. 1.

Таблица 1

Рецептура фуранового полимербетона (массовые доли)

Компонент	Обозначение	Содержание, масс. %	Примечание
Смола ФФ-1А	Связующее	22,2	Фурано-формальдегидная смола
Отвердитель (50 % БСК)	Инициатор	2,2 (10 % от смолы)	50%-ный водный раствор
Кварцевый песок	Наполнитель	33,3	Фракция 0,1–0,6 мм, $M_{кр} = 1,8$
Гранитный щебень	Наполнитель	44,4	Фракция 5–10 мм

2.2. Приготовление образцов и режимы отверждения

Образцы для испытаний изготавливались в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Полимербетонная смесь приготавливалась в лабораторном растворосмесителе принудительного действия. Последовательность загрузки компонентов: смола, половина песка, отвердитель, оставшийся песок и щебень. Общее время смешения составляло 4–5 минут для достижения однородной консистенции. Приготовленную смесь укладывали в стальные разборные формы, внутренняя поверхность которых была предварительно смазана разделительной смазкой. Формование осуществлялось путем послойного уплотнения на лабораторной виброплощадке (частота – 50 Гц, амплитуда – 0,5 мм) в течение 90 секунд. Основные типы и размеры изготовленных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Типы и размеры образцов для испытаний

Тип испытания	Форма образца	Размеры, мм	Количество в серии	Стандарт
Прочность на сжатие	Куб	100 × 100 × 100	6	ГОСТ 10180-2012
Химическая стойкость	Куб	100 × 100 × 100	6	ГОСТ 25246-2017
Морфология (СЭМ)	Призма	40 × 40 × 160	3	–
Кинетика (ДСК)	Порошок/пленка	~10–15 мг	5 на режим	–

После формования образцы подвергались отверждению по двум режимам: 1) стандартный режим – отверждение при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности 60 % в течение 7 суток с последующей распалубкой [9, 10]; 2) оптимизированный ступенчатый режим – выдержка в формах при 40 °С в течение 2 часов, затем нагрев до 80 °С и выдержка 3 часа, после термообработки – охлаждение в формах до комнатной температуры и распалубка. Для обеспечения достоверности результатов каждое определение выполнялось на серии из 6 образцов-кубов (для механических испытаний). Результаты обрабатывались статистически с вычислением среднего арифметического значения ($\bar{X}$), среднеквадратического отклонения (SD) и доверительного интервала при уровне значимости $p = 0,05$. Погрешность определения прочности на сжатие не превышала 5 %, а потери массы и прочности в химической среде – 7 % [11, 12].

2.3. Методы физико-химического и механического анализа

Кинетика отверждения изучалась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 404 F1 Pegasus (Netzsch) в атмосфере аргона. Исследованию подвергалась смесь смолы с отвердителем (без наполнителя). Проводились как динамические эксперименты при скоростях нагрева 2,5, 5 и 10 °С/мин в интервале 20–200 °С, так и изотермические при температурах 60, 70 и 80 °С. Степень превращения (α) вычислялась по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{total}}, \quad (1)$$

где ΔH_t – теплота, выделившаяся к моменту времени t ; ΔH_{total} – полная теплота реакции отверждения. Для описания кинетики использовали уравнение автокаталитической модели (модель Камми – Валлони):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \alpha^m, \quad (2)$$

где k – константа скорости, n и m – порядки реакции. Эффективную энергию активации (E_a) определяли по методу Озавы – Флинна – Уолла. Химические превращения контролировали методом ИК-Фурье-спектроскопии на спектрометре Tensor 37 (Bruker) в диапазоне 4000–400 см⁻¹. Образцы для анализа отбирались на разных стадиях гелеобразования и твердения. Морфологию структуры исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3. Изучались поверхности излома образцов после испытаний на прочность, а также шлифы [13, 14]. Физико-механические испытания включали определение прочности на сжатие (ГОСТ 10180-2012) и химической стойкости путем измерения изменения массы и прочности после выдержки в 10-процентном растворе H₂SO₄ в течение 30 суток.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Кинетика отверждения фуранового связующего

Динамические ДСК-кривые фуранового связующего с 10 % отвердителя демонстрируют одиночный экзотермический пик, положение которого смещается в область высоких температур с увеличением скорости нагрева (рис. 1). Полная теплота реакции ΔH_{total} составила в среднем 320 ± 15 Дж/г, что согласуется с литературными данными для реакций поликонденсации фурановых смол [15, 16].

Обработка изотермических ДСК-кривых позволила построить зависимости степени превращения α от времени при постоянных температурах 60 и 80 °С (рис. 2). На рисунке представлены две изотермические кривые $\alpha(t)$: ось абсцисс – время в часах, ось ординат – степень превращения,

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{total}}.$$

Выбор размерности времени (часы) соответствует характерному масштабу изотермического отверждения кислотно-катализируемого фуранового связующего при температуре 60–80 °С.

Кинетика отверждения описывается автокаталитической моделью (уравнение 2). При температуре 60 °С на начальной стадии скорость реакции невелика: за первые 1–2 ч степень превращения α обычно остается в пределах примерно 0–0,25, идет накопление кислотного катализатора. На стадии ускорения скорость резко возрастает; при $\alpha \approx 0,3$ –0,4 достигается

максимум скорости da/dt . Далее на стадии замедления скорость падает из-за истощения реакционноспособных групп и роста вязкости, кривая выходит на плато $\alpha \rightarrow 1$. При 80 °С те же стадии проходят быстрее: индукционный период короче, максимум скорости выше, высокая конверсия достигается раньше. Стрелки v_1-v_5 на рис. 2 – касательные к кривым $\alpha(t)$: v_1 – начальная (индукционная) стадия; v_2 – стадия ускорения; v_3 – максимальная скорость; v_4 – стадия замедления; v_5 – скорость на изотерме 80 °С в сопоставимой области α . Площадь под кривой тепловыделения соответствует полной теплоте реакции отверждения $\Delta H_{total} \approx 320 \pm 15$ Дж/г; на графике $\alpha(t)$ это выражается стремлением кривых к $\alpha \rightarrow 1$.

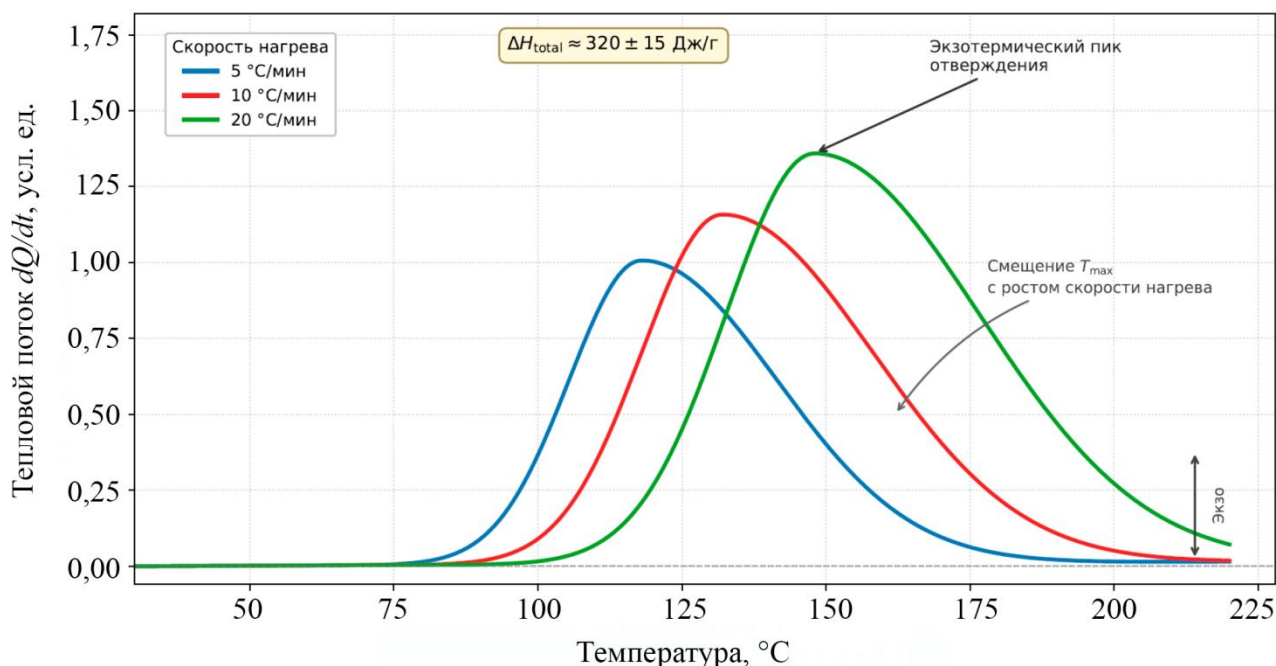


Рис. 1. Динамические ДСК-кривые отверждения фуранового связующего (10 % отвердителя БСК) при скоростях нагрева 5, 10 и 20 °С/мин

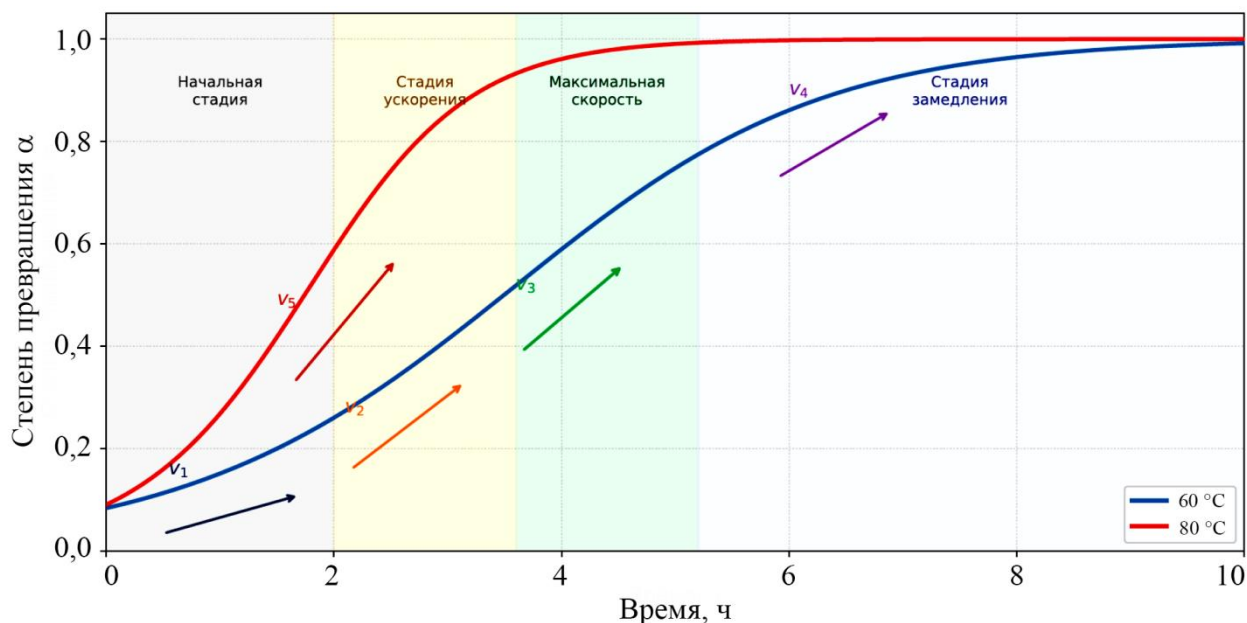


Рис. 2. Изотермические кривые степени превращения фуранового связующего (10 % БСК) при 60 и 80 °С; стадии процесса обозначены цветом; стрелки v_1-v_5 – касательные к кривым (локальная скорость da/dt)

Значения эффективных порядков реакции n и m составили 1,1–1,3 и 0,8–1,0 соответственно. Рассчитанная по методу Озавы – Флинна – Уолла эффективная энергия активации составила 70,5 кДж/моль, что указывает на высокую чувствительность скорости реакции к температуре и находится в диапазоне, типичном для кислотно-катализируемых конденсаций [17, 18].

Изотермы 60 и 80 °С характеризуют кинетику связующего по данным ДСК, и они не тождественны режимам твердения готовых образцов полимербетона. Стандартный режим твердения образцов – (20 ± 2) °С, 7 суток; оптимизированный ступенчатый – выдержка при температуре 40 °С в течение 2 ч с последующим нагревом до 80 °С и выдержкой 3 ч. При температуре 20 °С реакция протекает медленно, за время твердения конверсия остается неполной, что способствует формированию пористого межфазного слоя. Ступенчатый режим обеспечивает выход на умеренную конверсию при 40 °С (область геля без сильной витрификации) и ускоренное завершение поликонденсации при температуре 80 °С.

3.2. Изменение химической структуры по данным ИК-спектроскопии

ИК-спектры на разных стадиях отверждения фиксируют ключевые химические превращения (рис. 3). По мере отверждения наблюдается уменьшение интенсивности полос поглощения при 3120 см^{-1} (валентные колебания С–Н в фурановом кольце) и 1505 см^{-1} (колебания С=С фуранового цикла). Одновременно происходит рост и усложнение полос в области (1600–1700) см^{-1} , что связано с образованием сопряженных систем и метиленовых мостиков между фурановыми кольцами. Уменьшается широкая полоса в области 3400 см^{-1} , соответствующая гидроксильным группам и воде, что свидетельствует о конденсации с выделением воды [19, 20].

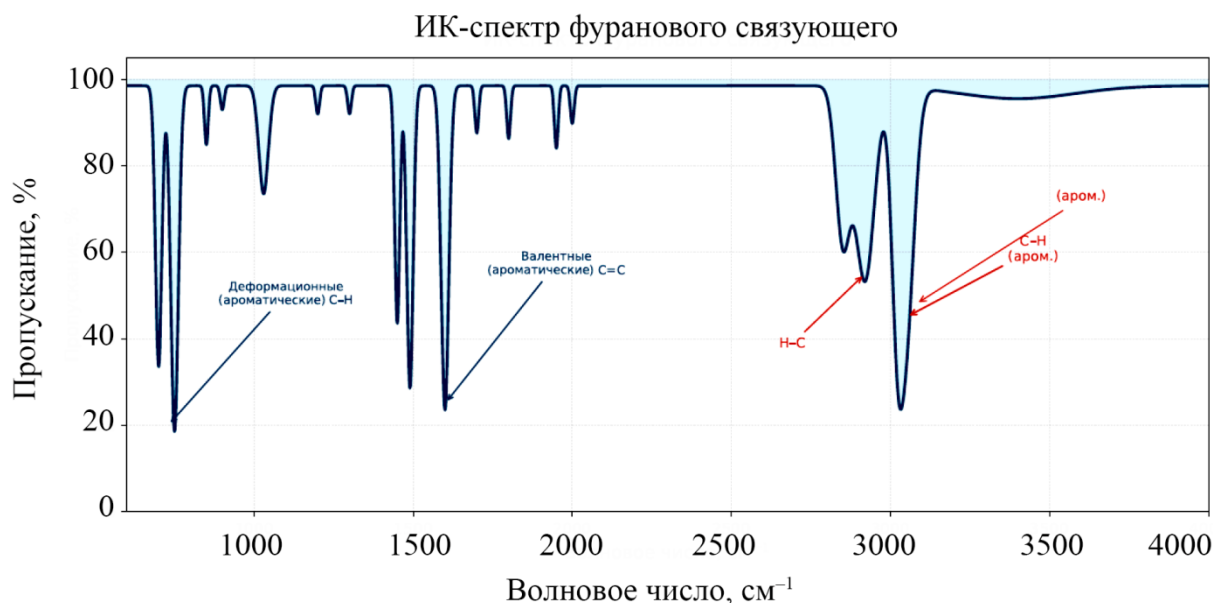


Рис. 3. Изменение числа пиков нитрильной группы

3.3. Влияние режима отверждения на микроструктуру и свойства ФПБ

СЭМ-микрофотографии излома ФПБ, отвержденного при разных режимах, показывают существенное влияние кинетики на морфологию (рис. 4). При стандартном отверждении (20 °С, 7 сут.) в межфазном слое между полимерной матрицей и частицами песка наблюдается значительная пористость и наличие микротрещин. Это связано с медленным протеканием реакции при низкой температуре, что приводит к неполной конверсии, высокой усадке и расслоению фаз (рис. 4 а). При оптимизированном ступенчатом режиме (выдержка 2 ч при 40 °С, затем 3 ч при 80 °С) структура становится значительно более монолитной. По-

лимерная матрица плотно обволакивает частицы наполнителя, поры имеют изолированный, сферический характер, что указывает на более контролируемое газовыделение (пары воды, летучие продукты). Этот эффект объясняется данными ДСК. Изотермическое отверждение при 40 °С позволяет достичь степени превращения $\alpha \approx 0,5-0,6$, при которой система переходит в состояние геля, но еще не витрифицируется (рис. 4 б). Последующий нагрев до 80 °С резко ускоряет реакцию (согласно константе скорости, зависящей от температуры по уравнению Аррениуса), позволяя быстро завершить поликонденсацию до высокой конверсии, до того, как витрификация ограничит молекулярную подвижность (рис. 4 с). В результате уменьшаются внутренние напряжения и формируется более совершенная структура [21–23].

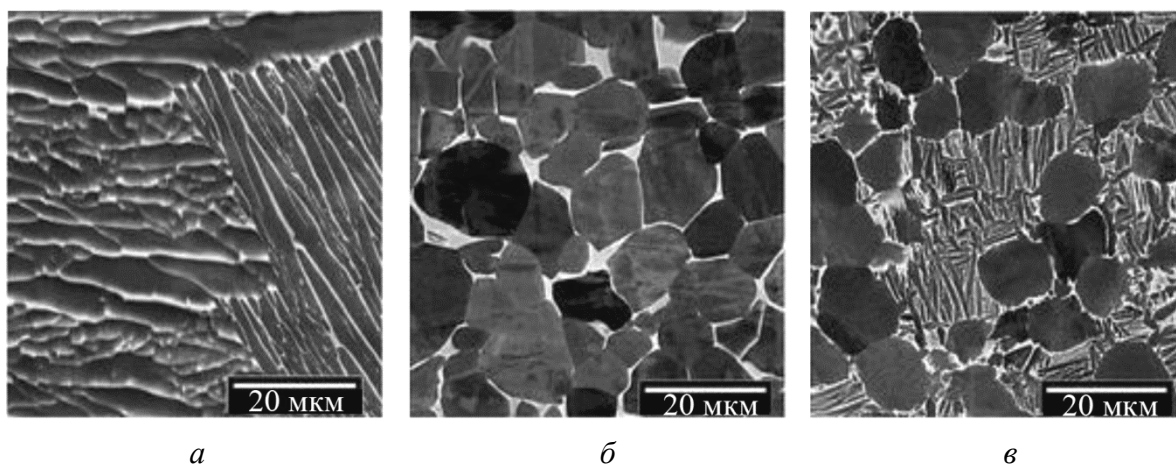


Рис. 4. СЭМ-микрофотографии излома ФПБ: стандартный режим отверждения (а); изотермический режим отверждения (б); оптимизированный режим отверждения (в)

Влияние режима отверждения на свойства ФПБ представлено в табл. 3. Как видно из таблицы, применение температурного режима, основанного на данных кинетического анализа, позволило повысить прочность на сжатие на 20,4 % и значительно улучшить химическую стойкость (потеря прочности снизилась более чем в 2 раза). Это прямое следствие повышения степени отверждения матрицы, снижения ее пористости и улучшения адгезии к наполнителю [24, 25].

Таблица 3

Свойства фуранового полимербетона при разных режимах отверждения

Режим отверждения	Прочность на сжатие, МПа	Потеря массы в H ₂ SO ₄ , %	Потеря прочности в H ₂ SO ₄ , %
Стандартный (20 °С, 7 сут.)	65,2	0,45	15,2
Оптимизированный ступенчатый	78,5	0,18	6,5

4. Заключение

Методом ДСК установлено, что кинетика отверждения фуранового связующего ФФ-1А с кислотным отвердителем описывается автокаталитической моделью с эффективной энергией активации ~70,5 кДж/моль. Наличие индукционного периода и резкого экзотермического максимума диктует необходимость тщательного контроля температуры на начальных стадиях процесса.

Показано, что между параметрами кинетических кривых (положение и форма пика, степень превращения) и морфологией структуры полимербетона существует прямая корре-

ляция. Низкая конверсия при низкотемпературном отверждении приводит к формированию дефектного, пористого межфазного слоя.

Предложен оптимизированный ступенчатый режим термообработки, основанный на данных кинетического анализа: начальная выдержка при 40 °С для достижения гелеобразования без витрификации с последующим нагревом до 80 °С для быстрого завершения реакции. Данный режим позволяет свести к минимуму внутренние напряжения и дефекты структуры.

Экспериментально установлено, что применение кинетически обоснованного ступенчатого режима отверждения позволяет повысить прочность на сжатие фуранового полимербетона на 20 % (с 65,2 до 78,5 МПа) и значительно улучшить его химическую стойкость в 10-процентной серной кислоте (снижение потери прочности с 15,2 % до 6,5 %) за счет формирования более монолитной и совершенной микроструктуры композита.

Полученные результаты вносят вклад в материаловедение полимерных композитов и имеют практическое значение для разработки технологических инструкций по производству высококачественных химически стойких фурановых полимербетонов.

Литература

1. Твердохлебов Д. А., Тармосин К. В., Ерофеев В. Т. Фурановые композиты каркасной структуры // Вестник Мордовского университета. – 2003. – Т. 13 (3–4). – С. 145–152.
2. Александров В. Б. Структурообразование и свойства модифицированного фуранового полимербетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. – Саратов, 1994. – 17 с.
3. Бормотов А. Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов специального назначения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.18. – Пенза, 2011. – 275 с.
4. Мошкин В. Н. Составы и технология фуранового полимербетона с использованием отходов никелевого производства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. – Саратов, 1990. – 15 с.
5. Усольцев Б. Е. Свойства и технология получения полимербетонных композиций на основе фурано-эпоксидных связующих : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06. – М., 2001. – 304 с.
6. Рассоха А. Н. Влияние рецептурно-технологических факторов на структуру и свойства фурано-эпоксидных полимерных систем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 1. – С. 6–9.
7. Липатов Ю. С. Физико-химия наполненных полимеров. – Киев : Наукова думка, 1967. – 233 с.
8. Rassokha A., Cherkashina A. Designing low viscosity furan-epoxy polymers of the materials for construction industry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3, No 6 (81). – P. 38–44. – DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71266.
9. Рассоха А. Н. Модифицированные фурано-эпоксидные полимерные материалы строительного назначения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 44–47.
10. Иващенко Ю. Г. Структурообразование, свойства и технология модифицированных фурановых композитов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. – Саратов, 1998. – 312 с.
11. Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2-е изд., испр. – М. : Либроком, 2009. – 589 с.
12. Бормотов А. Н. Оптимизация полимерной матрицы эпоксидных композитов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 1-1 (115). – С. 28–33. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.004.
13. Бормотов А. Н., Прошин И. А., Васильков А. В. Теоретические основы компьютерного моделирования структурообразования дисперсных систем // Вестник ТГТУ. – 2011. – Т. 17 (2). – С. 542–551.

14. Бормотов А. Н., Горохова А. А. Математическое моделирование структурообразования композиционных материалов при помощи динамических моделей // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 12 (102). – С. 22–28. – DOI: 10.23670/IRJ.2020.102.12.004.
15. Kloczkowski A., Sharaf M. A., Mark J. E. Computer simulations on filled elastomeric materials // Chemical Engineering Science. – 1994. – Vol. 49 (17). – P. 2889–2897. – DOI: 10.1016/0009-2509(94)E0107-2.
16. Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях умеренно-континентального климата / Т. А. Низина, В. П. Селяев, Д. Р. Низин, Н. С. Канаева, Д. А. Артамонов // Умные композиты в строительстве. – 2020. – Т. 1 (1). – С. 27–35. – DOI: 10.52957/27821919_2020_1_27.
17. Бормотов А. Н., Горохова А. А. Моделирование влияния модифицирующих добавок на реологические показатели композитов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 4 (106), ч. 1. – С. 51–56. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.008.
18. Полимерные композиционные материалы каркасной структуры / Б. А. Бондарев, П. В. Комаров, О. О. Корнеев, А. Ю. Сычев, А. А. Мещеряков, И. В. Немахов // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 3 (12). – URL: <https://esj.today/PDF/51SAVN320.pdf>
19. Хасимова А. С., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Литой бетон на основе композиционного гипсового вяжущего // Технологии бетонов. – 2015. – № 3–4 (104–105). – С. 23–25.
20. Jang K.-S. Mechanics and rheology of basalt fiber-reinforced polycarbonate composites // Polymer. – 2018. – Vol. 147. – P. 133–141. – DOI: 10.1016/j.polymer.2018.06.004.
21. Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения / Д. Р. Низин, Т. А. Низина, В. П. Селяев, Н. С. Канаева // Умные композиты в строительстве. – 2022. – Т. 3 (1). – С. 18–29. – DOI: 10.52957/27821919_2022_1_18.
22. P3D printed (binder jetting) furan molding and core sands—thermal deformation, mechanical and technological properties / A. Bobrowski, K. Kaczmarek, D. Drożyński, F. Woźniak, M. Dereń, B. Grabowska, S. Żymankowska-Kumon, M. Szucki // Materials. – 2023. – Vol. 16 (9). – 3339. – DOI: 10.3390/ma16093339.
23. Бормотов А. Н., Горохова А. А. Математическая модель вязкости ненаполненной эпоксидной смолы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 4 (94). – DOI: 10.23670/IRJ.2020.94.4.003.
24. Исследование прочностных и теплофизических свойств разрабатываемых композиционных фурано-эпоксидных полимерных материалов и покрытий на их основе / С. С. Негматов, Н. С. Абед, М. Ш. Тухлиев, Ш. А. Бозорбоев, Ж. Н. Негматов, Б. Т. Хаминов, С. У. Султонов, С. К. Имомназаров, Х. А. Махаммаджонов, С. Б. Юлчиева, Э. М. Мамасолиев // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2023. – 7 (112). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15807>
25. Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction / Z. N. Moldamuratov, R. S. Imambayeva, N. S. Imambayev, A. A. Iglikov, S. Zh. Tattibayev // Nanotechnologies in Construction. – 2022. – Vol. 14 (4). – P. 306–318. – DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318.