

А.И. МАКЕЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТА МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ РАЗРУШЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРЕ КОНГЛОМЕРАТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ¹

Аннотация. В публикации конгломератные строительные композиты (бетоны) идентифицируются как гетерогенные твёрдые тела с иерархически организованной пространственно-геометрической структурой характеристической размерностью от 10^{-10} до 10^{-1} м, обладающей минимум 5-6 масштабными уровнями и тремя типами конструкции подструктур, различающихся по своему масштабу, генезису и механике проявления свойств. Первый тип характерен для макро-, мезо- и микромасштабного уровней и принимается в виде двухкомпонентной «конструкции» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных твёрдых и газообразных (макропоры) включений; второй тип относится к субмикро-, ультрамикро- и наномасштабным уровням и полагается в виде «микромасштабной пространственной конструкции» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических разностей; третий тип, наконец, соответствует атомно-молекулярному строению новообразований цементирующего вещества. Дается характеристика выделяемых типов подструктур по масштабу слагающих их компонентов, особенностям формирования, механике проявления свойств, критериям конструирования и средствам синтеза каждой подструктуры.

Анализируются закономерности формирования маршрута трещины разрушения в подструктурах всех типов и субстанции каждого масштабного уровня. При этом развитие напряженно-деформированного состояния конгломератного композита по принципу диссипации энергии, локализации и повышения (концентрации) напряжений реализуется в направлении от макро- к атомно-молекулярному уровню структуры композита, а само же разрушение и, соответственно, формирование маршрута трещины во времени и в пространстве композита проходит в направлении от атомно-молекулярного уровня к макроуровню каскадно через все промежуточные структурные уровни. В рамках интегрированного механо-физико-химического подхода показывается место термофлуктуационной теории (физика разрушения) на этапах разрыва единичных атомно-молекулярных связей и механики трещин на этапах развития микро- и макроповреждений. Обсуждаются возможности применения теоретических закономерностей формирования маршрута трещины для постановки и решения практических задач конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов.

Ключевые слова: конгломератные строительные композиты, масштабные уровни структуры композитов, физика разрушения, механика трещин, маршрут трещины в многоуровневой структуре.

А.И. МАКЕЕВ¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

FORMATION OF THE ROUTE OF THE MAIN CRACK OF DESTRUCTION IN THE MULTI-LEVEL STRUCTURE OF CONGLOMERATE BUILDING COMPOSITES¹

Abstract. In the publication, conglomerate building composites (concrete) are identified as heterogeneous solids with a hierarchically organized spatial-geometric structure with a characteristic

© Макеев А.И., 2023

¹ Статья посвящена памяти академика РААСН, д.т.н., профессора Евгения Михайловича Чернышова (1936-2021)

dimension from 10-10 to 10-1 m, with a minimum of 5-6 scale levels and three types of substructure design that differ in scale, genesis and mechanics of properties manifestation. The first type is characteristic of the macro-, meso- and microscale levels and is taken in the form of a two-component "construction" of a spatially continuous matrix and discrete solid and gaseous (macropores) inclusions deterministically and stochastically distributed in it; the second type refers to the submicro-, ultra-micro- and nanoscale levels and is believed to be in the form of a "microscale spatial structure" of new formations of a cementitious substance from consolidated individual crystalline differences; the third type, finally, corresponds to the atomic-molecular structure of new formations of the cementing substance. Characteristics of the distinguished types of substructures are given according to the scale of their components, the peculiarities of formation, the mechanics of manifestation of properties, design criteria and means of synthesis of each substructure.

The patterns of formation of the fracture route in substructures of all types and substances of each scale level are analyzed. In this case, the development of the stress-strain state of the conglomerate composite according to the principle of energy dissipation, localization and increase (concentration) of stress is realized in the direction from the macro- to the atomic-molecular level of the structure of the composite, and the destruction itself and, accordingly, the formation of the crack route in time and in space of the composite passes in the direction from the atomic-molecular level to the macrolevel in a cascade through all intermediate structural levels. Within the framework of an integrated mechano-physico-chemical approach, the place of thermofluctuation theory (fracture physics) at the stages of breaking single atomic-molecular bonds and crack mechanics at the stages of development of micro- and macrodamage is shown. The possibilities of using theoretical principles of crack route formation to formulate and solve practical problems of designing and synthesizing optimal structures of conglomerate building composites are discussed.

Keywords: conglomerate building composites, scale levels of the structure of composites, fracture physics, fracture mechanics, crack path in a multilevel structure.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.Т. Условия реализации возможных режимов развития процесса разрушения твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 2. С. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Дамаскинская Е.Е., Фролов Д.И., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р. Идентификация критического состояния деформированных горных пород // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 1(34). С. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713
4. Колчунов В.И., Кузнецова К.Ю., Федоров С.С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плоскотянутых конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 3(95). С. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
5. Леденев В.В., Однолюк В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 312 с.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC // Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768.
7. Трещев А.А., Захарова И.А., Судакова И.А. О вариантах выбора диаграмм деформирования композитных материалов и не только // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2(17). С. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 3. Системная идентификация "конструкции структуры" конгломератных строительных композитов (в качественной постановке проблемы) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 3(747). С. 5-26.
9. Чернышов Е.М., Макеев А.И., Коротких Д.Н. Базовые положения механики проявления конструкционных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 1. Обзор результатов теоретических исследований проблемы конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство. 2020. № 8. С. 43-51
10. Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. и др. Расчетно-экспериментальные исследования внутренних напряжений в строительных материалах // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037.

11. Селяев В.П., Селяев П.В., Лазарев А.Л. и др. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4(53). С. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31.
12. Карапетьянц М.Х. Строение вещества. М.: Либроком, 2014. 312 с.
13. Илюхин В.В., Кузнецов В.А., Лобачёв А.Н., Бакшуттов В.С. Гидросиликаты кальция. Синтез монокристаллов и кристаллохимия. М.: Наука. 1979. 184 с.
14. Kulik D. A., Miron G. D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585.
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength // Cement and Concrete Composites, 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 535 с.
17. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. 124 с.
18. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Типы подструктур в целостной полиструктуре бетона и закономерности формирования параметров поля напряжений в композите (к развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов) // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Том 2. М: Изд-во АСВ, 2021. С. 304-314.
19. Вычислительные методы в механике разрушения / Под. ред. С. Алтури. М.: Мир, 1990. 392 с.
20. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО / Под общ. ред. А.М. Белостоцкого и П.А. Акимова. М.: Изд-во АСВ, 2016. 596 с.
21. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии). Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
22. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
23. Селяев В.П., Селяев П.В. Физико- химические основы механики разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 220 с.
24. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Структура и прочность конструкционных цементных композитов. Саранск, 2015. 360 с.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Макеев А.И. Базовые положения механики проявления конструкционных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 2. Обзор результатов прикладных исследований по проблеме конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство, 2020. № 9. С. 48-57
27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF // Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712.

REFERENCES

1. Belikov V.T. Usloviya realizatsii vozmozhnykh rezhimov razvitiya protsessa razrusheniya tverdogo tela [Conditions for the implementation of possible modes of development of the process of destruction of a solid body]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela. 2020. No. 2. Pp. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Damaskinskaya E.E., Frolov D.I., Panteleev I.A., Gafurova D.R. Identifikatsiya kriticheskogo sostoyaniya deformirovannykh gornykh porod [Identification of the critical state of deformed rocks]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2018. No. 1(34). Pp. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713
4. Kolchunov V.I., Kuznetsova K.Yu., Fedorov S.S. Model' kriteriya treshchinostoykosti i prochnosti plosoknapryazhennykh konstruktsiy iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona [Model of crack resistance and strength criterion for plane stressed structures made of high-strength fiber-reinforced concrete and fiber-reinforced concrete]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. No. 3(95). Pp. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26

5. Ledenev V.V., Odnolko V.G., Nguyen Z.Kh. Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya [Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics]. Tambov: Publishing House of FGBOU VPO "TSTU", 2013. 312 p.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC. / Cement and Concrete Composites, 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768
7. Treschev A.A., Zakharova I.A., Sudakova I.A. O variantakh vybora diagramm deformirovaniya kompozitnykh materialov i ne tol'ko [On options for choosing deformation diagrams for composite materials and not only]. Ekspert: teoriya i praktika. 2022. No. 2(17). Pp. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Chernyshov E.M., Makeev A.I., Korotkikh D.N. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruksionnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 1. Obzor rezul'tatov teoreticheskikh issledovaniy problemy konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 1. Review of the results of theoretical studies of the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Construction. 2020. No. 8. Pp. 43-51 (rus)
9. Chernyshov E.M. Makeev A.I. Materialovedeniye i tekhnologiya stroitel'nykh kompozitov kak sistema nauchnogo znaniya i predmet razvitiya issledovaniy. Chast' 3. Sistemnaya identifikatsiya "konstruktsii struktury" konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov (v kachestvennoy postanovke problemy) [Material science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and subject of research development. Part 3. System identification of the "structural structure" of conglomerate building composites (in a qualitative formulation of the problem)] // Izvestia of higher educational institutions. Construction. 2021. No. 3(747). Pp. 5-26. (rus)
10. Sokolova Yu.A., Kondrashchenko V.I., Kesariysky A.G. et al. Raschetno-eksperimental'nyye issledovaniya vnutrennikh napryazheniy v stroitel'nykh materialakh [Calculation and experimental studies of internal stresses in building materials]. Ekspert: teoriya i praktika, 2020. No. 4(7). Pp. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037
11. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Lazarev A.L. et al. Fraktal'naya kvantovo-mekhanicheskaya model' deformirovaniya i razrusheniya betona [Fractal quantum-mechanical model of deformation and destruction of concrete]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2022. No. 4(53). Pp. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31
12. Karapetyants M.Kh. Stroyeniye veshchestva [The structure of matter]. M.: Librokom, 2014. 312 p. (rus)
13. Ilyukhin V.V., Kuznetsov V.A., Lobachev A.N., Bakshutov V.S. Gidrosilikaty kal'tsiya. Sintez monokristallov i kristallokhimiya [Calcium hydrosilicates. Synthesis of single crystals and crystal chemistry]. M.: Science. 1979. 184 p. (rus)
14. Kulik D.A., Miron G.D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength. Cement and Concrete Composites, 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [Kinetic nature of the strength of solids]. M.: Nauka, 1974. 535 p. (rus)
17. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Prognozirovaniye povedeniya stroitel'nykh materialov pri neblagopriyatnykh usloviyakh ekspluatatsii [Predicting the behavior of building materials under adverse operating conditions]. Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University, 2009. 124 p.
18. Chernyshov E. M., Makeev A. I. Tipy podstruktur v tselostnoy polistrukture betona i zakonomernosti formirovaniya parametrov polya napryazheniy v kompozite (k razvitiyu teorii konstruirovaniya i sinteza struktur konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov) [Types of substructures in the integral polystructure of concrete and patterns of formation of stress field parameters in the composite (to the development of the theory of design and synthesis of structures of conglomerate building composites)] // Fundamental, search and applied research of RAASN on scientific ensuring the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific papers of the RAACS: in 2 volumes / Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN). Volume 2. M: DIA Publishing House, 2021. Pp. 304-314. (rus)
19. Vychislitel'nyye metody v mekhanike razrusheniya [Computational methods in fracture mechanics] / Pod. ed. S. Alturi. M.: Mir, 1990. 392 p. (rus)
20. Aktual'nyye problemy chislennoy modelirovaniya zdaniy, sooruzheniy i kompleksov. Tom 2. K 25-letiyu Nauchno-issledovatel'skogo tsentra StaDiO [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes. Volume 2. To the 25th anniversary of the StaDiO Research Center] / Under the general ed. A.M. Belostotsky and P.A. Akimov. M.: Izd-vo ASV, 2016. 596 p. (rus)
21. Korotkikh D.N. Treshchinostoykost' sovremennykh tsementnykh betonov (problemy materialovedeniya i tekhnologii) [Crack resistance of modern cement concretes (problems of materials science and technology)]. Voronezh: Voronezh GASU, 2014. 141 p. (rus)
22. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki betona [General models of concrete mechanics]. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)

23. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Fiziko- khimicheskiye osnovy mekhaniki razrusheniya tsementnykh kompozitov [Physico-chemical foundations of fracture mechanics of cement composites]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2018. 220 p. (rus)
24. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Struktura i prochnost' konstruktsionnykh tsementnykh kompozitov [Structure and strength of structural cement composites]. Saransk, 2015. 360 p.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. Cement and Concrete Research, 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N., Makeev A.I. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruktsionnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 2. Obzor rezul'tatov prikladnykh issledovaniy po probleme konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 2. Review of the results of applied research on the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2020. No. 9. Pp. 48-57.
27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF. Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712

Информация об авторе:

Макеев Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

Information about author:

Makeev Alexey Iv.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,

candidate of sciences, associate professor, associate professor of the department of Technology of Building Materials, Products and Structures.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru