

УДК 691.32:620.191

СТРУКТУРНАЯ ДИНАМИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Выровой В. Н.¹, Суханов В. Г.¹

¹Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Аннотация: Строительные изделия и конструкции представляют собой открытые сложноорганизованные динамические самоорганизующиеся системы. Это предполагает, что структура материала является неотъемлемой частью структуры конструкции. Анализ позволил предложить классификацию элементов структуры по скорости реакции на внутренние и внешние воздействия. На каждом уровне структурных неоднородностей материала и в самой «конструкции-системе» выделены консервативные, метастабильные, активные элементы структуры, а также распределенные в материале конструкции локальные и интегральные остаточные деформации. Особенное внимание уделяется активным элементам, к которым отнесены технологические трещины и внутренние поверхности раздела. Это объясняется тем, что сам факт присутствия трещин предполагает неравновесное состояние отдельной подсистемы и всей системы. Установлено, что переход в состояние локализованного во времени (временного) динамического равновесия осуществляется путем изменения параметров трещин и диссипацией энергии на внутренних поверхностях раздела. Происходит спонтанная структурная перестройка, при которой свойства остаются на требуемом уровне. Трещины, которые способствуют сохранению функциональных свойств материалов и изделий за счет изменений собственных параметров, отнесены к «трещинам-созидателям». При достижении критических ситуаций «трещины-созидатели» могут трансформироваться в «трещины-разрушители», которые рассматриваются в виде самостоятельной динамической саморазвивающейся системы, возникающей внутри базовой системы. Целевая установка новой системы заключается в прохождении собственного жизненного цикла. Новая система переориентирует целевые функции базовой системы на себя и использует весь потенциал базовой системы для собственного развития. Завершение жизненного цикла трещины разрушения как «системы-паразита» автоматически приводит к выходу из функционирования «конструкции-системы». Рассмотрены технологические и конструктивные способы минимизации рисков, связанных с трансформацией «трещин-созидателей» в «трещины-разрушители» («системы паразиты»).

Ключевые слова: конструкция, система, элементы структуры, самоорганизация, трещины.

STRUCTURAL DYNAMIC OF BUILDING COMPOSITES

V. Vyrovoy¹, V. Sukhanov¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: Building products and constructions are open complexly organised dynamic self-organizing systems. This suggests that the structure of the material is an integral part of the structure of the constructure. The analysis allowed us to propose a classification of the elements of the structure according to the speed of reaction to internal and external influences. At each level of structural inhomogeneities of the material and in the “construction-system” itself, conservative, metastable, active elements of the structure are identified, as well as local and integral residual deformations distributed in the construction material. Particular attention is paid to active elements, which include technological cracks and internal interfaces. This is explained by the fact that the very presence of cracks implies a nonequilibrium state of a separate subsystem and the entire system. It is established that the transition to a state of localized (temporal) dynamic equilibrium in time is carried out by



changing the parameters of cracks and energy dissipation at internal interfaces. A spontaneous structural adjustment occurs, in which the properties remain at the required level. Cracks that contribute to the preservation of the functional properties of materials and products due to changes in their own parameters are referred to as “creator cracks”. When critical situations are reached, “crack-builders” can be transformed into “crack-destroyers”, which are considered as an independent dynamic self-developing system arising within the base system. The target installation of the new system is to go through its own life cycle. The new system reorients the target functions of the base system towards itself and uses the full potential of the base system for its own development. The completion of the life cycle of a fracture crack as a “parasite system” automatically leads to the exit from the functioning of the “structure-system”. Technological and constructive ways to minimize the risks associated with the transformation of “crack-builders” into “crack-destroyers” (“parasite systems”) are considered.

Keywords: construction, system, structure elements, self-organization, cracks.

1 ВВЕДЕНИЕ

Индивидуальное функциональное поведение строительных изделий и конструкций должно быть предсказуемым в течение нормируемого периода эксплуатации зданий и сооружений, в состав которых они входят. Предсказания (прогноз), даже если они достаточно логичные и точные, не могут и не способны заменить объяснение процессов и явлений, протекающих при перманентном изменении внешних условий, что характерно для строительных объектов различных видов и назначения. Объяснение и понимание расширяют границы возможностей управления механизмами реализации тех или иных процессов. Особенно это актуально при изменении свойств материала под действием комплекса возникающих при эксплуатации нагрузок, что неизбежно сказывается на изменении свойств конструкций. Уровень допустимого изменения свойств материалов регламентируется нормативными документами, что позволяет количественно оценить текущее состояние конструкции. Накопленный опыт показал, что при удовлетворительных средних значениях требуемых свойств материалов в конструкции может возникнуть критическая ситуация. Как правило, события, сопровождающие такие ситуации, локализованы и связаны с образованием новой для материала и конструкции составляющей – трещины. Процесс развития трещин инициируется внешними и внутренними факторами и провоцирует структурные перестройки в материале, перераспределение напряжений и деформаций в конструкции, что может стимулировать дальнейшее развитие трещин до критических параметров. Любой процесс, включая процесс роста трещин, не поддается анализу путем его остановки. Поэтому для установления факторов управления процессом необходимо изучить историю его возникновения и развития, что позволит выработать представление о механизмах течения процесса с учетом фактора времени.

2 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обязательное присутствие истории развития позволяет проследить структурную трансформацию материала и изделия с учетом и пониманием, что нет «хороших» или «плохих» элементов, все они неотъемлемые – части целого. Представление материала и конструкции в виде неразрывной целостности позволяет рассматривать конструкцию как открытую сложную самоорганизующуюся систему [1,2,3]. Система не существует вне ее структурного оформления. Профессор В. И. Соломатов и его последователи подчеркивали полиструктурность композиционных строительных материалов и изделий. Взаимосвязь и взаимовлияние различных уровней структурных составляющих отмечается в работах П. Г. Комохова, П. В. Кривенко, В. И. Большакова, В. Н. Деревянко, А. Н. и А. П. Плуговых, Р. Ф. Руновой, А. Г. Вандаловского, В. И. Братчуна, И. Штарка, М. Ш. Файнера, Е. С. Шинкевич, А. В. Мишутина и многих других отечественных и зарубежных исследователей.

Процессам самоорганизации в периоды формирования структуры и эксплуатации строительных композитов посвящены работы М. Д. Корчака, Л. А. Шейнича, Е. К. Пушкаревой, И. В. Барабаша, А. Н. Бобрышева, В. М. Хрулева, В. Л. Чернявского, С. Фица и др. Роль трещин в формировании свойств материалов и конструкций показана в исследованиях Н. И. Карпенко, К. И. Пирадова, Ю. В. Зайцева, В. С. Дорофеева, В. В. Болотина, И. М. Грушко, И. И. Лучко, С. И. Солодкого, С. Н. Леоновича, Р. Лермита. Влияние рецептурно-технологических факторов на формирование свойств строительных материалов и изделий изучено в исследованиях В. А. Вознесенского, Т. В. Ляшенко, Л. И. и О. Л. Дворкиных, С. В. Ковалю, А. Е. Шейкина, И. Н. Ахвердова, М. А. Саницкого, Т. И. Горчакова и многих других исследователей.

Все перечисленные (и многие другие) исследования выполнены, как правило, в рамках действующей парадигмы, в которой подчеркивается, что уровень конечных свойств материалов и изделий определяется начальным составом, технологическими условиями получения материалов и их переработки в конструкцию. В готовой конструкции материал рассматривается как некая данность вне истории его образования и вне особенностей его структурного оформления. Несовпадение терминологии технологов-материаловедов и конструкторов препятствует выработке совместных конфигураций взаимодействия. При этом очевидно, что не существует изделий и конструкций вне их материального наполнения, как и не существует материала без его конструктивного оформления.

Системный подход позволяет органично объединить материал и конструкцию в неразрывное целое - систему с заданной целевой функцией. В такой системе реализуется принцип соучастия всех структурных элементов в функционально ориентированном поведении «конструкции-системы». При анализе структурно оформленной «конструкции-системы» возможно и даже необходимо создание общего терминологического словаря, что расширит понятийный аппарат материаловедов и конструкторов и создаст предпосылки иных базовых моделей, формирующих профессионально-научные взгляды и убеждения на общей, взаимно согласованной терминологической основе.

3 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации декларируемого подхода была поставлена цель – обосновать выбор динамических моделей, позволяющих определить набор элементов структуры конструкции-системы, наличие, взаимодействие и развитие которых обеспечивает её рабочее функциональное состояние. Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие основные задачи исследования:

- проанализировать основные механизмы структурных изменений материала (бетона) и конструкции на различных уровнях структурных неоднородностей при внешних и внутренних воздействиях;
- проанализировать роль элементов структуры в структурном развитии материала, рассматривая их коэволюцию, как первооснову устойчивости «конструкции-системы»;
- оценить влияние трещин, как активных элементов структуры, в развитии и разрушении материала и конструкции;
- предложить классификацию трещин в зависимости от их влияния на спонтанную структурную перестройку;
- дать рекомендации по технологическим и конструктивным способам минимизации рисков, связанных с переходом трещин в категорию самостоятельных «систем-паразитов», автоматически приводящих к выходу из функционирования «конструкций-систем».

4 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на бетонных моделях и образцах нормативных форм и размеров в соответствии с государственными стандартами Украины и специально разработанными методиками с использованием аттестованной измерительной техники и испытательного оборудования.

При начальном описании и анализе «конструкции-системы» уместным является вербальный метод [4]. Он позволяет на качественном уровне раскрыть структуру системы, установить базовые процессы ее развития, описать механизмы

взаимодействия между разномасштабными структурами. В свою очередь вербальный метод является базовым при реализации когнитивных подходов, которые ставят своей целью исследовать процессы восприятия, категоризации, осмысления и объяснения объектов, а также репрезентации и хранения знаний [5,6]. Когнитивный подход уместен в случаях: - если взаимосвязность процессов ведет к необходимости рассматривать отдельные явления в их совокупности; - при отсутствии достаточной количественной информации о динамике структурного развития; - при развитии процессов самоорганизации, что затрудняет построение количественных моделей. Использование методов когнитивного моделирования, основанного на проведении мысленных экспериментов, позволяет, при накоплении соответствующей информации, перейти на следующем этапе к количественным моделям. В данной работе использованы методы качественного описания «конструкции-системы». Проведенные ранее исследования [3,7] позволили предложить классификацию структурных элементов, основанную на их различной «чувствительности» при воздействии на «конструкцию-систему» внешних и внутренних факторов. В общем случае можно выделить консервативные, метастабильные и активные структурные элементы.

К консервативным (от лат. *conservation* - сохранение) структурным элементам относят элементы, которые практически не изменяют либо достаточно медленно изменяют свои параметры в период выполнения объектом заложенных в него функций. Как правило, консервативные элементы принадлежат масштабному уровню, на котором доминирующими являются силы тяжести и на котором реализуются феноменологические подходы оценки свойств.

Элементы структуры, которые в данных условиях обладают относительной устойчивостью и которые способны самопроизвольно перейти в устойчивое или неустойчивое состояние при действии внешних или внутренних факторов, отнесены к метастабильным (от греч. *meta* – между, после, через) элементам структуры.

Отличительным признаком активных (от лат. *activus* - деятельный) элементов структуры является их способность адекватно реагировать на испытываемые воздействия в соразмерном временном интервале (одном темпоритме).

5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Весь набор структурных элементов система в виде строительных изделий и конструкций приобретает в технологический период получения бетона и его переработки в изделия (конструкции). На этом этапе все исходные элементы активно участвуют в процессах разномасштабного структурного оформления с образованием новых элементов структуры формирующейся системы. Не исключены ситуации, при которых возникающие промежуточные структурные образования инициируют зарождение и развитие принципиально иных элементов, входящих в структуру конечного продукта. Характерно проявление эффектов эквивинальности (от лат. *aequus* – равный, соразмерный; *finalis* – конечный), – под которыми в нашем случае понимается реализация различных механизмов структурной организации, которые приводят к появлению качественно одинаковых элементов структуры. В качестве примеров рассмотрено зарождение технологических трещин: - при образовании дискретных структур на уровне продуктов новообразований и на уровне взаимодействия исходных зерен минеральных вяжущих; - при развитии градиентов собственных деформаций на границах раздела твердеющего матричного материала и заполнителей; - под действием возникающих градиентов деформаций на уровне изделий или конструкций.

Таким образом, в период функционирования «конструкция-система» вступает с определенным набором структурных элементов, включая наличие технологических

(остаточных, начальных, наследственных) локальных и интегральных деформаций. Поэтому функционирование следует рассматривать как непрекращающийся «структурный дрейф» в направлении, при котором проявляются эффекты адаптации системы в условиях перманентного воздействия эксплуатационной среды. В связи с этим жизненный цикл конструкции предлагается описывать историей коэволюции структурных составляющих, рис. 1.

Коэволюция различных по виду и назначению элементов структуры предполагает их взаимодействие, что является первоосновой устойчивости – способности системы сохранять динамическое равновесие за счет проявления внутренней и внешней безопасности.

Особенное внимание следует уделить трещинам. Термин «трещина» общий для материаловедов и конструкторов, изначально несет негативный смысл. Трещина представляет собой локализованный элемент структуры. Феномен локализации приводит к распаду непрерывной среды на отдельные локальные структуры. Поэтому когда в конструкции появляется трещина, парадигма непрерывности автоматически теряет смысл. Наши исследования дают основания утверждать, что трещины являются неизбежной и необходимой структурной составляющей на всех уровнях структурных неоднородностей. «Трещины-созидатели» способствуют релаксации деформаций, в том числе критических, сохраняют свойства целого путем изменения собственных параметров, могут трансформироваться во внутренние поверхности раздела, включать в работу метастабильные и консервативные структурные элементы.

Взаимодействие и взаимовлияние структурных элементов повышает разнообразие структуры, способствует выработке межструктурных связей, обеспечивая тем самым проявление явлений гомеостаза, что обеспечивает жизнеспособность системы. Для реализации движения структуры в сторону самосохранения «конструкции-системы» следует определить приоритетный ряд элементов, способных влиять на периоды наступления неблагоприятных ситуаций. В таком приоритетном ряду первое место занимает трещина, которая в силу определенных причин перешла из ранга «трещины-созидателя» в «трещину-разрушителя», реализовав тем самым идею самоорганизованной критичности [8] и определив начало иной истории жизненного периода системы.

С момента образования «трещины-разрушителя» (точка М, рис. 2) нужно рассматривать истории развития двух систем – базовой «конструкции-системы» и вновь образованной «трещины-системы». «Трещина-система» в силу своей активности, (которая проявляется через перераспределение деформаций с их концентрацией по фронту трещины, выделение поверхностной энергии по мере увеличения площади берегов трещины, вовлечение в процесс своего развития разномасштабных трещин и поверхностей раздела), переориентирует функции базовой системы на себя.

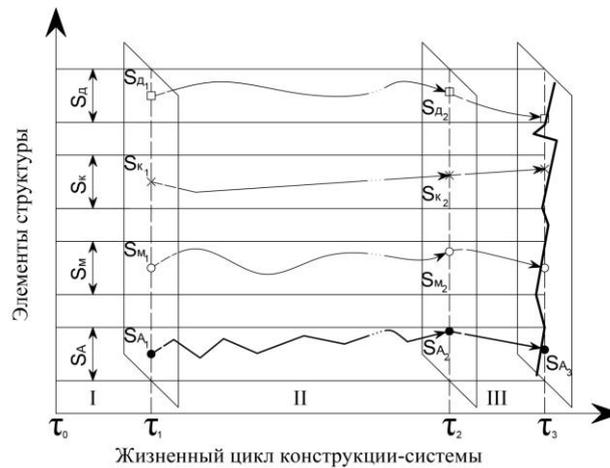


Рис. 1. Коэволюция элементов структуры в период функционирования «конструкции-системы»

I – этап становления «конструкции-системы» (τ_1); II – период функционирования «конструкции-системы» ($\tau_1 \dots \tau_2$); III – этап выхода конструкции-системы из безопасного функционирования ($\tau_2 \dots \tau_3$);

S_A, S_M, S_K, S_D – структурные составляющие (элементы) «конструкции-системы»;

$S_{A1}, S_{M1}, S_{K1}, S_{D1}$ – начальный набор активных (A_1), метастабильных (M_1), консервативных (K_1) элементов и технологических деформаций (S_{D1});

$S_{A1} \dots S_{A2}$ – изменение параметров активных элементов;

$S_{M1} \dots S_{M2}$ – изменение параметров метастабильных элементов;

$S_{K1} \dots S_{K2}$ – изменение параметров консервативных элементов;

$S_{D1} \dots S_{D2}$ – изменение локальных и интегральных остаточных деформаций;

S_{A3} – изменение структурных параметров саморазвивающейся «системы-паразит».

При увеличении степени структурного разнообразия конструкции уровень ее безопасного функционирования снижается. В этот период поведение «конструкции-системы» определяется динамикой развития новой системы, которая по своей сути является «системой-паразитом», рис. 2.

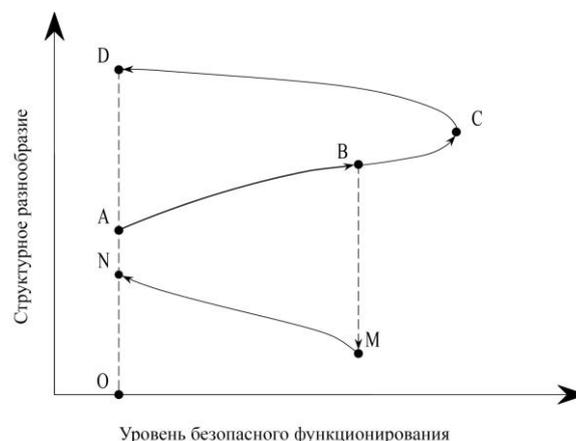


Рис. 2. Динамическая модель изменения структурного разнообразия в течение жизненного цикла «конструкции-системы»

O – минимально допустимый уровень безопасного функционирования;
 A – необходимый набор элементов структуры, обеспечивающий безопасное функционирование конструкции-системы;
 $(A-B)$ – структурные трансформации в период функционирования;
 B – самозарождение в конструкции-системе «системы-паразита»;
 $(B-C)$ – интегральные структурные изменения базовой системы;
 M – переориентирование целевой функции «конструкции-системы» на цель функционирования самозародившейся системы;
 $(C-D)$ – снижение уровня безопасного функционирования «конструкции-системы»;
 $(M-N)$ – активное функционирование «системы-паразита»;
 N – завершение жизненного цикла «системы-паразита»;
 D – завершение жизненного цикла «конструкции-системы».

Такое определение на наш взгляд правомерно, поскольку трещина самозародилась в базовой структуре и черпает энергию для собственного развития из своего окружения – материала конструкции системы.

Цель существования и развития «системы-паразита» заключается в полном прохождении собственных этапов своего жизненного цикла – от самозарождения через развитие до завершения своего существования. Завершением существования «трещины-системы» является выход ее фронта на поверхность базовой системы. На этом завершается жизненный цикл «системы-паразита», что вызывает неизбежное завершение истории существования «конструкции-системы». Таким образом, инфляция структуры «конструкции-системы» через вырождение всего многообразия структурных составляющих до возникновения новой сравнительно простой «системы-паразита» приводит к нарушению ее внешней безопасности и полному выходу из функционального состояния.

6 ВЫВОДЫ

Представление строительных изделий и конструкций в виде структурно организованных систем на данном этапе исследований следует рассматривать как своеобразное начало объяснения механизмов функционирования структурированных объектов. Структурный подход базируется на укореняющейся научной идеологии, основанной на идеях и методах системного мышления и синергетике, для которых понятие «структура» является доминирующим.

Неизбежный сдвиг парадигм в направлении структурированных объектов значительно ускорится при создании совместного терминологического словаря материаловедов и конструкторов и выработке общего стратегического направления получения «конструкций-систем» с требуемым набором необходимых элементов структуры.

Литература

1. Корчак М. Д. Синергетика в теории и практике / М. Д. Корчак, А. Ф. Чепцов – Электросталь. ЭПИ МИСиС., 2006. – 434 с.
2. Дидрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дидрих – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Суханов В. Г. Структура материала в структуре конструкции / В. Г. Суханов, В. Н. Выровой, О. А. Коробко – Одесса: Полиграф, 2016. – 244.
4. Могилевский В. Д. Методология систем: вербальный подход / В. Д. Могилевский – М.: Экономика, 1999. – 251 с.
5. Вандейк Т. А. Язык. Познание, Коммуникация / Т. А. Вандейк – М.: Прогресс, 1989. – 312 с.

6. Рудакова А. В. Когнитология и когнитивная лингвистика / А. В Рудакова – Воронеж, 2002. – 69 с.
7. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов – Одесса: ТЭС, 2010 – 152 с.
8. Бак П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности / П. Бак – М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 276 с.

References

1. Korchak, M. D., Cheptsov, A. F. (2006). Sinergetika v teorii i praktike. Elektrostal EPI MISiS, 434.
2. Didrih, Ya. (1984). Proektirovanie i konstruirovaniye: Sistemnyiy podhod. M.: Mir, 456.
3. Sukhanov, V. G., Vyrovoy, V. N., Korobko, O. A. (2016). Struktura materiala v strukture konstruktсии. Odessa: Poligraf, 244.
4. Mogilevskiy, V. D. (1999). Metodologiya sistem: verbalnyiy podhod. M.: Ekonomika, 251.
5. Vandeyk, T. A. (1989). Yazyik. Poznanie, Kommunikatsiya. M.: Progress, 312.
6. Rudakova, A. V. (2002). Kognitologiya i kognitivnaya lingvistika. Voronezh, 69.
7. Virovyy, V. N., Dorofeev, V. S., Sukhanov, V. G. (2010). Kompozitsionnyie stroitelnyie materialyi i konstruktсии. Struktura, samoorganizatsiya, svoystva. Odessa: TES, 152.
8. Buck, P. (2014). Kak rabotaet priroda: Teoriya samoorganizovannoy kritichnosti. M.: URSS: Knizhkoviy dim “LIBROKOM”, 276.

Выровой Валерий Николаевич

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, д.т.н., профессор
ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина 65029
vyrovoy@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8818-4112

Суханов Владимир Геннадиевич

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, д.т.н., профессор
ул. Дидрихсона, 4, Одесса, Украина 65029
sukhanov@mail.ua
ORCID: 0000-0002-5831-2811

Для посилань:

Вировий В.М. Структурна динаміка будівельних композитів / В. М. Вировий, В. Г. Суханов // Механіка та математичні методи. – 2019. – №2. – С. 27-35.

For references:

Vyrovoy, V., Sukhanov, V. (2019). Structural dynamic of building composites. Mechanics and Mathematical Methods, 2, 27-35