

О проблеме управления рецептурно-технологическими факторами получения бетонов в задачах конструирования и синтеза оптимальных их структур

Е.М.Чернышов, Академический центр «Архстройнаука» ВГТУ, Воронеж

А.И.Макеев, ВГТУ, Воронеж

Обсуждается проблема места и роли рецептурно-технологических факторов конструирования и синтеза структур бетонов с позиций управления параметрами поля напряжений в них при механическом нагружении и, соответственно, показателями сопротивления их разрушению. Формирование поля напряжений в структуре бетонов как конгломератных строительных композитов рассматривается в системе явлений аккумуляции, диссипации, локализации и концентрации энергии внешнего воздействия эксплуатационной среды на материал в конструкции. При этом параметры поля напряжений анализируются в соотнесении с рецептурно-технологическими факторами, предопределяющими характеристики конструируемой и синтезируемой однородно-неоднородной структуры композитов. По критериям минимизации величин напряжений в композите обосновываются предложения по обеспечению наиболее эффективной работы силовых структурных связей конструируемого материала в работе под нагрузкой¹.

Ключевые слова: конгломератные строительные композиции; критерии однородности/неоднородности; поле напряжений; конструирование оптимальной структуры

On the Problem of Control of Prescription-Technological Factors of Concrete Production in the Course of Design and Synthesis of its Optimal Structure

E.M.Chernyschov, Academic Center of VSTU, Voronezh

A.I.Makeev, VSTU, Voronezh

The problem of the place and role of the prescription and technological factors in the design and synthesis of concrete structures from the viewpoint of controlling the parameters of the stress field in them under mechanical loading and, respectively, the resistance to their destruction is discussed. Formation of the stress field in the structure of concrete as conglomerate building composites is considered in the system of phenomena of accumulation, dissipation, localization and concentration of energy of the external influence of the operating environment on the material in the structure. In this case, the parameters of the stress field are analyzed in relation to the prescription and technological factors that

¹ Исследования выполнены по теме 7.2.5 «Управление критериями однородности (неоднородности) конгломератных строительных композитов в задачах конструирования их оптимальных структур» Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН в области архитектуры, градостроительства и строительных наук, на 2018 год

predetermine the characteristics of the constructed and synthesized homogeneously inhomogeneous structure of the composites. According to the criteria for minimizing the stress values in the composite, proposals are made to ensure the most effective operation of the structural bonds of the constructed material in work underload.

Keywords: composites construction conglomerate; criteria of homogeneity/heterogeneity; stress field; design of the optimal structure.

Мотивы подготовки данной публикации соотносятся с актуализацией проблем современного строительного материаловедения, определяемой развитием концепций и становлением научных оснований перехода к моделированию и компьютерному цифровому конструированию оптимальных физических структур конгломератных строительных композитов [1–6].

Компьютерное цифровое конструирование опирается на принципы формализации и моделирования реальных физических систем. В связи с этим на настоящем этапе одной из главных задач строительного материаловедения является формирование базы научного знания и ключевых категорий, отвечающих этому положению. Получение необходимых теоретических и экспериментальных результатов исследований должно опираться на методологию формулы «4С» («состав – структура – состояние – свойства») [7; 8], которая позволяет системно отражать закономерные причинно-следственные связи конструкционных, функциональных свойств композитов с их составом, структурой и состоянием как «на момент изготовления» (в технологическом цикле), так и «развёрнутых во времени» (в эксплуатационном цикле).

В отношении конструкционных свойств, характеризующих потенциал работоспособности композитов при действии механических нагрузок на строительные конструкции, сущность причинно-следственных закономерностей раскрывается через учёт [9–11] и анализ особенностей и условий формирования поля напряжений в однородно/неоднородной структуре [12; 13], являющейся следствием и результатом влияния рецептурно-технологических структурообразующих факторов при получении структур материалов (рис. 1).

Как следует из структурно-логической схемы (см. рис. 1), а также предлагаемой методологии конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных компо-

зитов (рис. 2), управление формированием поля напряжений в их полимасштабной (макро-, мезо-, микро-, субмикро-, нано-) структуре, а, соответственно, потенциалом и пределом сопротивления их разрушению, заключается в оптимизации характеристик структуры и критериев однородности/неоднородности строения материала на всех указанных уровнях.

С учётом такого понимания проблемы управления параметрами поля напряжений в структуре конгломератных строительных композитов при механическом их нагружении следует рассматривать цели и содержание данной публикации.

В соответствии с этим авторами публикации осуществлены аналитические построения и выполнены экспериментальные исследования, раскрывающие причинно-следственные отношения в закономерной взаимосвязи:

$$\begin{aligned}
 & \langle \text{потенциал сопротивления композита разрушению } R \rangle = \\
 & = f (\langle \text{параметры полей напряжений в полимасштабной} \\
 & \text{структуре композита} \rangle) = \\
 & = \varphi (\langle \text{критерии однородности/неоднородности струк-} \\
 & \text{туры} \rangle) = \\
 & = \psi (\langle \text{параметры состава, структуры, состояния компо-} \\
 & \text{зита} \rangle) = \\
 & = \Phi (\langle \text{рецептурно-технологические факторы управле-} \\
 & \text{ния на этапах технологии композита и конструкции} \rangle).
 \end{aligned}$$

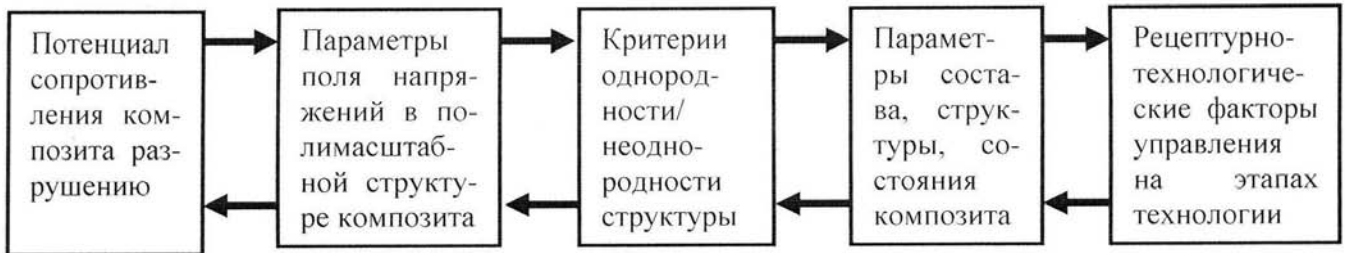


Рис. 1. Структурно-логическая схема причинно-следственных связей и соотношений в разрабатываемой проблеме

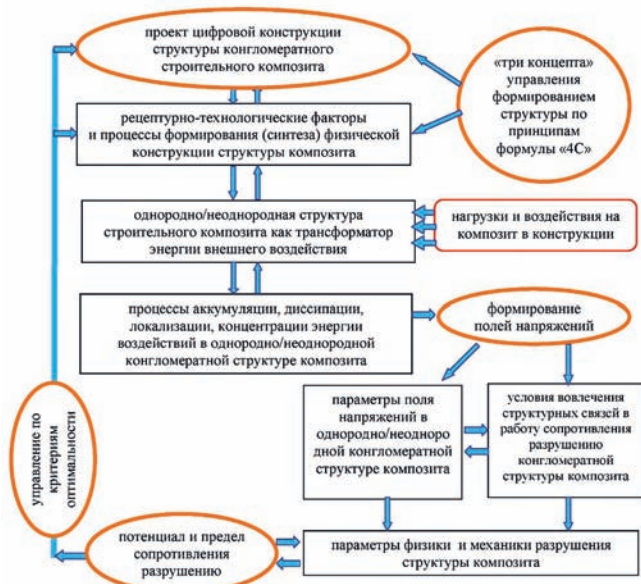


Рис. 2. Методология конструирования и синтеза конгломератных строительных композитов на основе трёх концептов управления формированием структуры по принципам формулы «4С»

Формализация критериев однородности/неоднородности и характеристик структуры в задачах управления параметрами поля напряжений в композите

Объективно существование признаков однородности/неоднородности строения композита определяется наличием скачка свойств и состояний субстанции матрицы и включений на межкомпонентной границе их раздела. Аналитически это выявляется при переходе из одной точки занимаемого материалом пространства в другую его точку (рис. 3).

В данном рассмотрении (см. рис. 3) важно обратить внимание на связь понятий границы раздела фаз и скачка: граница раздела предполагает наличие скачка, уточним: скачка состояния в материальном (субстанциальном) рассмотрении пространства материала. В геометрическом рассмотрении пространства материала скачок имеет местоположение на межкомпонентной границе раздела.

Согласно нашим разработкам [13–16], конгломератная однородно/неоднородная структура строительных композитов (в их числе и бетонов) раскрывается через систему критериев, отражающих субстанциональную, геометрическую, субстанционально-геометрическую, статистическую компоненты данной фундаментальной категории (табл. 1).

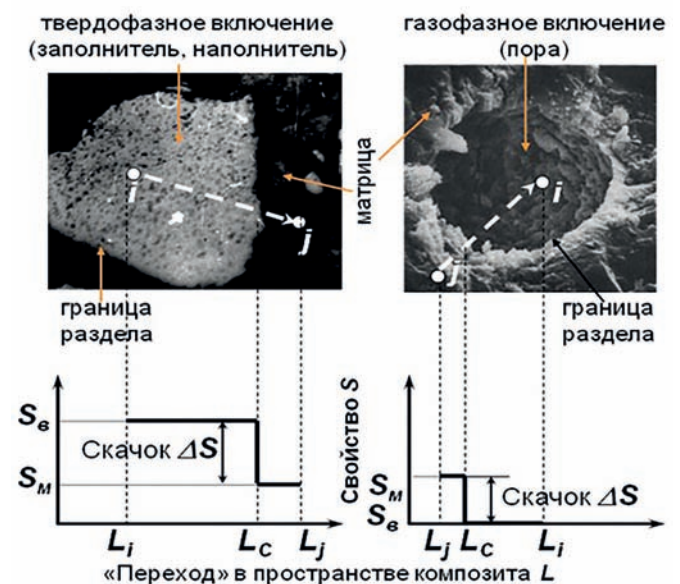


Рис. 3. Скачок свойств и состояний субстанции матрицы и включений в двухкомпонентной системе «матрица – включение»

Таблица 1. Система аналитических соотношений для характеристики состава, структуры и критериальной оценки однородности/неоднородности строения конгломератного строительного композита (на любом *i*-том масштабном уровне)

Критерии	Аналитические соотношения и оценки
Субстанциональные критерии $A_1(x)$ и оценки	
Градиент разнородности ΔS , фаз. ед. ком.	$\Delta S = S_n - S_m$, где S_n, S_m – оценочный параметр или свойство соответственно матрицы и включения <i>i</i> -того масштабного уровня структуры
Коэффициент разнородности K_1 , отн. ед.	$K_1 = S_n/S_m$
Медиатор разнородности J_1 , отн. ед.	$J_1 = \frac{ S_n - S_m }{S_n}$
Геометрические критерии $A_1(g)$ и оценки	
Удельная площадь поверхности $F_{уд}$, максимум поперечной границы раздела «матрица-включения», m^2/m^3 Плотность кластеризации структуры на каждом масштабном уровне M_c , ед.	$F_{уд} = f(N_c, D_c) = 6 k_1 k_{2c} V_c/D_c$, где V_c – объемная доля включений, m^3/m^3 , D_c – средний размер включений, м, k_1 – коэффициент, учитывающий эталонную форму включений от сферической, k_{2c} – коэффициент, учитывающий фрактальность поверхности включений $N_c = V_c/D_c^3$ – число кластеров в единичном объеме M_c , где $v_c = \pi D_c^3/6$ – объем кластера, m^3 , π – число структурных единиц в кластере
Критерий размерной конгруэнтности M_c , отн. ед.	$M_c = L_c/D_c$, где L_c – характеристический размер конгломерата на данном масштабном уровне, м
Субстанционально-асимметричные критерии $A_2(b-g)$ и оценки	
Смесь M_b , фаз. ед. ком.	$M_b = S_{max} - S_{min}$, где S_{max} и S_{min} – максимальное и минимальное значение субстанционального свойства по фронтальной протяженности контактной зоны матрицы и включения
Фронтальная протяженность сдвига (толщина контактной зоны матрицы и включения) L , м	$L = l$, где l – фронтальное удаление от исходной (начальной) границы раздела матрицы и включения, м
Фронтальная градиентность сдвига ρ_b	$\rho_b = (S_{max} - S_{min})/L$
Статистические критерии $A_3(r)$ и оценки	
Статистические оценки математического ожидания M , дисперсия σ^2 , коэффициента вариации C_v , вероятностных функций распределения корреляционных структурных составляющих композита по размеру, форме, пространственному размещению и др.	$M = \int_{-\infty}^{\infty} x \varphi(x) dx$, где $\varphi(x)$ – плотность вероятности распределения соответствующей характеристике x $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M)^2 \varphi(x) dx$ $C_v = \frac{\sigma}{M}$

Идентификационными характеристиками и параметрами полимасштабной структуры конгломератных строительных композитов, определяющими условия формирования в них поля напряжений и конструкционный потенциал материала, обоснованно считать следующие:

- 1) число разномасштабных уровней «матрица–включение» в конструируемой иерархической структуре композита – N_n ;
- 2) субстанциональную разнородность свойств матрицы и включений каждого масштабного уровня структуры [модуля деформативности от механической нагрузки $E(\sigma)$, температурного $\varepsilon(t)$, влажностного $\varepsilon(W)$ воздействия и т.п.];
- 3) объёмное содержание матрицы V_M и включений V_B в каждом масштабном уровне структуры (цементацию по коэффициенту избытка матрицы в конгломератной структуре на каждом масштабном уровне – V_M/V_B);
- 4) показатель D – формы включений в матрице;
- 5) показатель кластеризации структуры на каждом масштабном уровне – N_{cl} ;
- 6) площадь границы раздела матрицы и включений (удельная $F_{S_{уд}}$ и суммарная F_S) на каждом масштабном уровне;
- 7) фронтальную характеристику скачка (толщину контактной зоны) в каждом масштабном уровне – t_s ;
- 8) показатель размерной конгруэнтности (масштабного соответствия) элементов структуры смежных масштабных уровней N_k , характеризующий геометрическое соотношение структурных элементов в смежных масштабных уровнях и отвечающий условию конструирования квазиоднородной структуры.

Выделенные идентификационные характеристики и параметры полимасштабной структуры конгломератных строительных композитов являются общезначимыми признаками (атрибутами) её модели. И именно потому, что они в полной мере отвечают сущности связи механики проявления свойств конгломератных строительных композитов с их строением, поскольку непосредственно определяют количественную картину процессов аккумуляции, диссипации, локализации и концентрации энергии внешнего воздействия в системе структурных связей материала.

Понимание и характеристика закономерностей этих процессов в количественной постановке представляется на сегодня актуальной материаловедческой проблемой.

Именно в данной трактовке авторы понимают «идеологию» формализации и создания компьютерной модели, необходимой для решения прикладных вопросов конструирования и синтеза оптимизируемых структур бетонов. Такая модель, рассматриваемая как своего рода цифровой двойник физической модели конструируемой структуры композита, должна учитывать и включать количественные характеристики предложенной системы критериев последовательно по п. 2–7 для каждого из числа N_n масштабных уровней структуры. Одновременно с этим модель должна по п. 8 отвечать условию квазиоднородности структуры композита как такового и как работающего в структуре строительной конструкции.

Рецептурно-технологическое «факторное пространство» в задачах конструирования и синтеза структур строительных композитов

Обратимся к аналитическому рассмотрению проблемы места и роли рецептурно-технологических факторов в управлении структурой однородно/неоднородных конгломератных строительных композитов, то есть опосредованно в управлении параметрами поля напряжений в материале и его потенциалом работоспособности в строительной конструкции. И в этой связи прежде всего отметим, что количественные значения идентификационных параметров структуры при её конструировании и синтезе достигаются обоснованным выбором, назначением и обеспечением следующих рецептурно-технологических факторов:

- 1) вида и свойств применяемой гидратно-синтезной (например цементной), гидротермально-синтезной (например силикатной) или термально-синтезной (например керамической) системы твердения, предопределяющей субстанциональные характеристики матрицы S_M в композите в соотношении с субстанциональными характеристиками включений в ней;
 - 2) вида и свойств частиц заполнителя, наполнителя, обладающих соответствующими своими субстанциональными характеристиками S_B и выступающих в качестве включений и концентраторов напряжений в матрице композита;
 - 3) компонентного состава формовочной смеси, обуславливающего объёмные доли матрицы V_M и включений V_B в объёме полученного композита V_k ;
 - 4) формы частиц заполнителя, наполнителя k_ϕ как соответствующих включений, выполняющих роль концентраторов напряжений в матрице композита;
 - 5) статистической функции распределения частиц заполнителя, наполнителя по форме $\frac{dn_B}{dk_\phi}$;
 - 6) состава заполнителя, наполнителя по среднему размеру фракций включений $\overline{D_B}$ и статистическому распределению включений по размеру $\frac{dn_B}{dD_B}$;
 - 7) режимов перемешивания компонентов для объёмного однородного размещения их в формовочной смеси и в готовом материале (интенсивность – критерий Рейнольдса Re_M ; удельная энергия перемешивания – $Q_{уд}$, приведённая к единице объёма или массы [17]);
 - 8) режимов формования смеси для обеспечения упаковки и переупаковки частиц исходных компонентов и рационального уплотнения смеси (интенсивность уплотнения U_ϕ , определяемая амплитудой A , мм, частотой колебаний f , Гц. $U = 8\pi^3 \cdot A^2 \cdot f^3$ [18]);
 - 9) режимов твердения для обеспечения химико-минералогических и морфологических характеристик синтезируемой субстанции матрицы и в целом композита (температуры $t_{ТВ}$, продолжительности $\tau_{ТВ}$, избыточного давления $P_{изб}$ и др.).
- Опираясь на изложенное, в принципе можно предложить своего рода «матрицу» системы факторов (табл.

2) получения структурированной системы композита в соотношении с особенностями, закономерностями формирования в ней поля напряжений как следствия закономерного (см. рис. 1, 2) влияния рецептурно-технологических факторов на состав, структуру и состояние композита и, соответственно этому, на условия и результат процессов аккумуляции, диссипации, локализации и концентрации напряжений в материале.

Представленная система рецептурно-технологических факторов, влияющих на формирование однородности/неоднородности структуры и, соответственно, параметров поля напряжений в композите, закладывается в основу процедур конструирования его «проектной» структуры, «переход» от

которой к реальной структуре осуществляется в производственном цикле получения материала.

Необходимо отметить, что вся совокупность рецептурно-технологических факторов на этапе априорного проектировании конструкции конгломератной структуры композита по формуле «4С», а также на этапе постановки экспериментов по выявлению основных технологических закономерностей формирования реальной структуры разделяется на «факторы начальных условий», «факторы-ограничения» и варьируемые «факторы управления» (рис. 4).

Наряду с этим имеет смысл остановиться на «группировке» факторов по признаку их влияния на критерии однородности/неоднородности структуры композита.

Таблица 2. Матрица системы факторов в задачах конструирования и синтеза структур строительных композитов (на примере типичных цементных бетонов)

Этап технологии	Рецептурно-технологические факторы управления	Параметры состава, структуры, состояния	Критерии однородности/неоднородности структуры	Параметры поля напряжений в полноразмерной структуре материала
1. Этап выбора исходного состава сырьевой смеси	B_0 V_0 V_1 V_2 V_3 V_4 V_5 V_6 V_7 V_8	M_0 B_0 $B_1 \cdot \varphi$ $\varphi \varphi$ $\varphi \varphi \varphi$	субстанциональные ΔS K_0 K_1 F_{00}	Аккумуляция A энергии внешнего воздействия (ΔW_0) в сырьевых компонентах при его работе и перемещении $A(\Delta W_0) = \int_0^t \frac{dW_0}{dt} dt,$ где $\frac{dW_0}{dt}$ – диссипация энергии внешнего воздействия по объему структуры материала
2. Этап подготовки сырьевых компонентов	V_0 V_1 V_2 V_3 V_4 V_5 V_6 V_7 V_8	M_0 M_1 $M_2 \cdot V_0$	K_0 K_1 субстанционально-геометрическое K_2	$\frac{dW_0}{dt} = \varphi \{A_0(t); A_1(t); A_2(t); A_3(t); A_4(t)\}$
3. Этап приспособления формовочной смеси	R_{00} Q_{00}	M_0 R_0	A_0 φ	Послойная локализация напряжений в сырьевых компонентах $\Delta \sigma_{00} = f(\Delta \sigma_{00}, \Delta \sigma_{00} = \sigma)$
4. Этап формования	U_0	A_0	статистические S	Концентрация полей напряжений в структуре материала
5. Этап твердения	V_0 R_{00} σ_0	M_0 K_{00}^1	S σ^2 C_0	$\sigma_{000} = f(\Delta \sigma_{00})$

* K_{00} – коэффициент завершенности процессов структурообразования системы твердения в строительном композите [19].

При такой группировке в первую очередь необходимо иметь в виду субстанциональные критерии однородности/неоднородности $A_h(s)$ (см. табл. 1), на которые из всей совокупности рецептурно-технологических факторов влияют химико-минералогический состав исходных компонентов, деформационные, прочностные, тепло- и гидрофизические и подобные их характеристики. Именно они определяют параметры скачка субстанциональных характеристик в объёме композита, а потому и картину поля напряжений как результата развития явлений локализации и концентрации энергии по «итогам» её аккумуляции и диссипации в микрообъёмах и микроразделах структурированной системы материала.

Во вторую очередь, следует иметь в виду группу геометрических критериев однородности/неоднородности $A_h(g)$ (см. табл. 1). По влиянию на них рецептурно-технологических факторов нужно исследовать и получить информацию о значении фракционного состава, объёмного содержания структурных включений в композите, геометрии и пространственной их ориентации в объёме композита, характеристического размера каждого масштабного уровня. В данном отношении на мегамасштабном уровне структуры композита в конструкции – это размер его сечения; на всех других структурных уровнях – толщина межчастичного слоя матричной субстанции. Именно эти факторы определяют однородность размещения границ раздела в объёме композита и, следует сказать, мезо- и макрооднородность поля напряжений, появление объёмов и зон перенапряжения структурных связей.

В-третьих, по субстанционально-геометрической группе критериев однородности/неоднородности $A_h(s-g)$ (см. табл. 1), следует иметь в виду получение экспериментальных данных о значении химико-минералогического состава и свойств поверхности частиц включений при формировании

фронтальной градиентности и фронтальной протяжённости контактной зоны «матрица–включение», предопределяющих возможность изменения степени рассеяния энергии внешней нагрузки в объёме композита и снижение уровня концентрации напряжений в нём вследствие «растягивания» зоны локализации и концентрации напряжений.

Обеспечение условий наиболее эффективной работы силовых связей в структуре однородно/неоднородного конгломератного строительного композита в условиях его нагружения в строительной конструкции, то есть повышение потенциала и уровня его сопротивления разрушению, достигается оптимизацией кинетики процессов аккумуляции, диссипации, локализации, концентрации напряжений по объёму материала, по системе его структурных связей. В такой постановке композит может рассматриваться в качестве своего рода трансформатора, преобразователя энергии внешнего воздействия в энергию внутренних напряжений.

Теоретические и экспериментальные данные исследований [20; 21] закономерностей формирования параметров поля напряжений в нагруженном композите как функции характеристик его структурной неоднородности и масштабной многоуровневости позволяют обозначить следующие постулирующие положения конструирования оптимальной структуры [22]:

постулат первый – переход к структурам с минимально достаточным в них числом масштабных уровней;

постулат второй – формирование контактной зоны матрицы и включений с возможно максимальной площадью поверхности раздела, с одновременным обеспечением диффузности состояния контакта. Можно ожидать, что при таких условиях процесс диссипации энергии будет характеризоваться минимизацией величин напряжений в элементарном объёме композита;

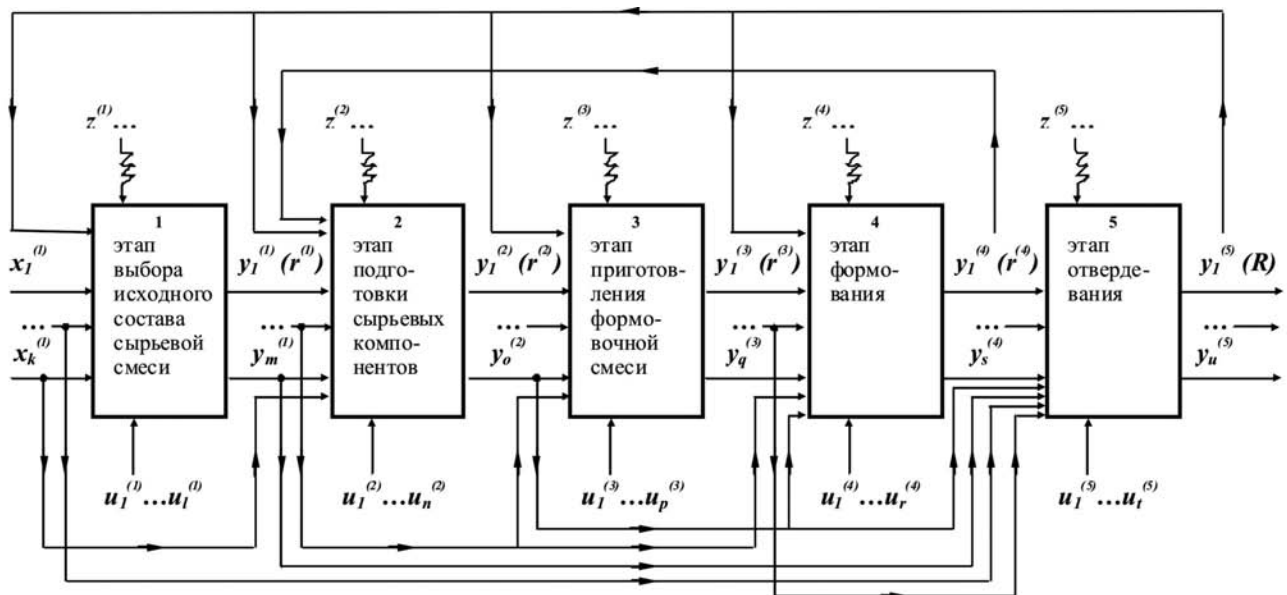


Рис. 4. Схема причинно-следственных связей входных (x, \dots, u, \dots), управляющих (u, \dots), случайных (z, \dots) факторов, выходных параметров, критериев (y, \dots, R) этапов производственного цикла получения конгломератных строительных композитов [19]

постулат третий – использование кристаллохимически родственных компонентов в составе исходных технологических смесей с целью синтеза максимально прочных физико-химических связей в контактной зоне. Следует полагать, что данное положение конструирования и синтеза структуры композита отвечает условию повышения меры аккумулирования энергии внешнего воздействия во внутреннюю энергию материала как средства увеличения его потенциала сопротивления разрушению;

постулат четвёртый – поуровневая оптимизация конгломератной структуры композитов на основе применения сырьевых составляющих с возможно минимальной субстанциональной разнородностью, обеспечивающей снижение уровня концентрации напряжений и величину «скачка» на границе раздела любого соответствующего масштабного уровня структуры;

постулат пятый – оптимизация структуры композита по критерию размерной конгруэнтности на каждом его масштабном уровне. Такая оптимизация исходит из условия обеспечения квазиоднородности структуры рассматриваемого масштабного уровня, что создаст предпосылки снижения локальных перенапряжений;

постулат шестой – максимально равномерное размещение включений в объёме каждого структурного уровня материала. Данное условие предельно достижимой квазиоднородности конгломератной структуры отвечает возможности более однородной диссипации энергии внешнего воздействия по объёму материала.

Представленные аксиомы и положения в соотношении с разработанной характеристикой «факторного пространства в задачах конструирования и синтеза однородно/неоднородных структур строительных композитов» отражают, как мы полагаем, понимание концепций и оснований, существа технологических проблем управления параметрами поля напряжений в структуре однородно/неоднородных конгломератных строительных композитов.

Аналитическое рассмотрение задач исследований места и роли рецептурно-технологических факторов в управлении формированием поля напряжений в однородно/неоднородной структуре конгломератных строительных композитов «задаёт» методологию эмпирического изучения закономерностей и механизмов действия каждого из таких факторов и всей их системы.

Литература

1. Баженов, Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких. // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
2. Чернышов, Е.М. Развитие теории системно-структурного материаловедения и высоких технологий строительных композитов нового поколения / Е.М. Чернышов // Строительные материалы. – 2011. – № 7. – С. 54–60.
3. Бабков, В.В. О некоторых закономерностях связи структуры и прочности бетона / В.В. Бабков, Р.И. Бурангулов, А.А. Ананенко [и др.] // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – № 2. – С. 16–20.
4. Белов, В.В. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Строительные материалы. – 2009. – № 9. – С. 88–90.
5. Миронов, В.А. Методы оптимизации составов сыпучих систем / В.А. Миронов, А.И. Голубев. – Тверь: ТГТУ, 2003. – С. 76.
6. Максимова, И.Н. Структура и прочность конструктивных цементных композитов / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев [и др.]. – Саранск, 2015. – 360 с.
7. Чернышов, Е.М. Концепция, проблематика и структура современной системы управления качеством в производстве строительных материалов и изделий / Е.М. Чернышов // Известия Казанского гос. арх.-строит. ун-та. – 2005. – № 2. – С. 11–14.
8. Чернышов, Е.М. Формула «4С» («состав – структура – состояние – свойства») в концептуально-методологической парадигме современного системного материаловедения / Е.М. Чернышов // Строительные материалы – 4С: состав – структура – состояние – свойства: Междунар. сб. науч. трудов. – Новосибирск, 2015. – С. 5–12.
9. Карпенко, Н.И. Общие модели механики бетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
10. Karihaloo, B.L. Fracture Mechanics and Structural Concrete / B.L. Karihaloo; Fourth Edition. – Longman Scientific & Technical, 1995. – 330 p.
11. Bazant, Z.P. Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials / Z.P. Bazant, J. Planas. – Florida: CRC Press, Boca Raton, 1998.
12. Будештский, Р.И. Элементы теории прочности зернистых композиционных материалов / Р.И. Будештский. – Тбилиси: Мецниереба, 1972. – 82 с.
13. Чернышов, Е.М. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории / Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев. – Воронеж, 2012. – 98 с.
14. Чернышов, Е.М. Критерии однородности/неоднородности в задачах конструирования структур конгломератных строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Вторые Полаковские чтения : сб. науч. статей по мат-лам междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 105-летию со дня рождения проф. Алексея Филипповича Полака. – Уфа : Реактив, 2017. – С. 8–21.
15. Чернышов, Е.М. Неоднородность строения как фундаментальная материаловедческая характеристика строительных композитов / Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, А.И. Макеев // Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 2. – Воронеж, 1999. – С. 390–402.
16. Чернышов, Е.М. К моделированию напряжённого состояния структурно-неоднородных конгломератных ком-

позитов в строительных конструкциях / Е.М. Чернышов, А.И. Makeev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – Volume 11. – Issue 2. – 2015. – С. 160–170.

17. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

18. Шмигальский, В.Н. Формование изделий на виброплощадках / В.Н. Шмигальский. – М.: Стройиздат, 1968. – 104 с.

19. Чернышов, Е.М. Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов (вопросы методологии, структурное материаловедение, инженерно-технологические задачи): Дис. ... докт. техн. наук. / Е.М. Чернышов – Воронеж, 1988. – 523 с.

20. Чернышов, Е.М. Исследования показателей сопротивления строительных композитов механическому разрушению в связи с их структурной неоднородностью / Е.М. Чернышов, А.И. Makeev, Е.И. Дьяченко // Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 4. – М., 2001. – С. 196–202

21. Чернышов, Е.М. Общие положения интегрированного механо-физико-химического подхода к процессу деформирования и разрушения строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Makeev // Вестник БГТУ, 2005. – № 9. – С. 256–258.

22. Чернышов, Е.М. Разрушение конгломератных строительных материалов: основные концепции, механизмы процессов, принципы и закономерности управления / Е.М. Чернышов, А.И. Makeev // Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials DFMN2007: Сб. статей по мат-лам Второй междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 2007. – С. 450–452.

Literatura

1. Bazhenov Yu.M. Konstruirovaniye struktur sovremennykh betonov: opredelyayushhie printsipy i tehnologicheskie platformy / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkih. // Stroitel'nye materialy. – 2014. – № 3. – С. 6–14.

2. Chernyshov E.M. Razvitiye teorii sistemno-strukturnogo materialo-vedeniya i vysokih tehnologiy stroitel'nykh kompozitov novogo pokoleniya / E.M. Chernyshov // Stroitel'nye materialy. – 2011. – № 7. – С. 54–60.

3. Babkov V.V. O nekotorykh zakonornostyakh svyazi struktury i prochnosti betona / V.V. Babkov, R.I. Burangulov, A.A. Ananenko [i dr.] // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1983. – № 2. – С. 16–20.

4. Belov V.V. Formirovaniye optimal'noj makrostruktury stroitel'noj smesi / V.V. Belov, M.A. Smirnov // Stroitel'nye materialy. – 2009. – № 9. – С. 88–90.

5. Mironov V.A. Metody optimizatsii sostavov sypuchih sistem / V.A. Mironov, A.I. Golubev. – Tver': TGTU, 2003. – С. 76.

6. Maksimova I.N. Struktura i prochnost' konstruktsionnykh tsementnykh kompozitov / I.N. Maksimova, N.I. Makridin, V.T. Erofeev [i dr.]. – Saransk, 2015. – 360 с.

7. Chernyshov E.M. Kontseptsiya, problematika i struktura sovremennoj sistemy upravleniya kachestvom v proizvodstve stroitel'nykh materialov i izdelij / E.M. Chernyshov // Izvestiya Kazanskogo gos. arh.-stroit. un-ta. – 2005. – № 2. – С. 11–14.

8. Chernyshov E.M. Formula «4S» («sostav – struktura – sostoyaniye – svoystva») v kontseptual'no-metodologicheskoy paradigme sovremennoy sistemnoy materialovedeniya / E.M. Chernyshov // Stroitel'nye materialy – 4S: sostav – struktura – sostoyaniye – svoystva: Mezhdunar. sb. nauch. trudov. – Novosibirsk, 2015. – С. 5–12.

9. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki betona / N.I. Karpenko. – М.: Strojizdat, 1996. – 416 с.

12. Budeshtskij R.I. Elementy teorii prochnosti zernistyykh kompozitsionnykh materialov / R.I. Budeshtskij. – Tbilisi: Metsniereba, 1972. – 82 с.

13. Chernyshov E.M. Neodnorodnost' struktury i soprotivlenie razrusheniyu konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialo-vedcheskogo obobshheniya i razvitiya teorii / E.M. Chernyshov, E.I. D'yachenko, A.I. Makeev. – Voronezh, 2012. – 98 с.

14. Chernyshov E.M. Kriterii odnorodnosti/neodnorodnosti v zadachah konstruirovaniya struktur konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Vtorye Polakovskie chteniya : sb. nauch. statej po mat-lam mezhdunar. nauch.-tehn. konf. posvyashh. 105-letiyu so dnya rozhdeniya prof. Aleksey Filippovicha Polaka. – Ufa: Reaktiv, 2017. – С. 8–21.

15. Chernyshov E.M. Neodnorodnost' stroeniya kak fundamental'naya materialovedcheskaya harakteristika stroitel'nykh kompozitov / E.M. Chernyshov, E.I. D'yachenko, A.I. Makeev // Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN. Vyp. 2. – Voronezh, 1999. – С. 390–402.

16. Chernyshov E.M. K modelirovaniyu napryazhennogo sostoyaniya strukturno-neodnorodnykh konglomeratnykh kompozitov v stroitel'nykh konstruktsiyah / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – Volume 11. – Issue 2. – 2015. – С. 160–170.

17. Strenk F. Peremeshivaniye i apparaty s meshalkami / F. Strenk. – Л.: Himiya, 1975. – 384 с.

18. Shmigal'skij V.N. Formovaniye izdelij na vibroploshhadkah / V.N. Shmigal'skij. – М.: Strojizdat, 1968. – 104 с.

19. Chernyshov E.M. Upravleniye protsessami strukturoobrazovaniya i kachestvom silikatnykh avtoklavnykh materialov (voprosy metodologii, strukturnoe materialovedeniye, inzhenerno-tehnologicheskie zadachi): Dis. ... dokt. teh. nauk. / E.M. Chernyshov – Voronezh, 1988. – 523 с.

20. Chernyshov E.M. Issledovaniya pokazatelej soprotivleniya stroitel'nykh kompozitov mehanicheskomu razrusheniyu v svyazi s ih strukturnoy neodnorodnost'yu / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev, E.I. D'yachenko // Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN. Vyp. 4. – М., 2001. – С. 196–202

21. Chernyshov E.M. Obshhie polozheniya integrirovannogo mehano-fiziko-himicheskogo podhoda k protsessu deformirovaniya i razrusheniya stroitel'nykh kompozitov / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Vestnik BGTU, 2005. – № 9. – С. 256–258.

22. *Chernyshov E.M.* Razrushenie konglomeratnyh stroitel'nyh materialov: osnovnye kontseptsii, mehanizmy protsessov, printsipy i zakonomernosti upravleniya / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials

DFMN2007: Sb. statej po mat-lam Vtoroj mezhdunar. konf. «Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov». – M.: IMET im. A.A. Bajkova RAN, 2007. – S. 450–452.

Чернышов Евгений Михайлович, 1936 г.р. (Воронеж). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Директор академического центра «Архстройнаука» ФГБУ ВО «Воронежский государственный технический университет (394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84. ВГТУ). Сфера научных интересов: системно-структурное строительное материаловедение и высокие технологии, физика прочности и механика разрушения конгломератных строительных композитов. Автор более 500 научных публикаций, в т.ч. 8 монографий. Тел.: +7 (910) 749-99-67. E-mail: chem@vgasu.vrn.ru.

Макеев Алексей Иванович, 1972 г.р. (Воронеж). Кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций ФГБУ ВО «Воронежский государственный технический университет (394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84. ВГТУ). Сфера научных интересов: системно-структурное строительное материаловедение и высокие технологии, физика прочности и механика разрушения конгломератных строительных композитов. Автор 52 научных публикаций в т.ч. 1 монография. Тел.: +7 (960) 114-03-60. E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru.

Chernyshov Evgeny Mihalovich, born in 1936 (Voronezh). Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS. Director of the Academic Center "Arkhstroy nauka" at the Voronezh State Technical University (394006, 20let Oktyabrya st., 84 Voronezh. VSTU). Sphere of scientific interests: system-structural building material science and high technologies, physics of strength and mechanics of destruction of conglomerate building composites. The author of more than 500 scientific publications, including 8 monographs. E-mail: chem@vgasu.vrn.ru.

Makeev Alexey Ivanovich, born in 1972 (Voronezh). Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. The senior lecturer of faculty of technology of building materials, products and designs at Voronezh State Technical University (394006, 20let Oktyabrya st., 84 Voronezh. VSTU). Sphere of scientific interests: system-structural building material science and high technologies, physics of strength and mechanics of destruction of conglomerate building composites. The author of 52 scientific publications, including 1 monograph. E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru.