

DOI: 10.12737/article_5926a059318df6.36010247

¹Самошин А.П., канд. техн. наук, доц.,²Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.,¹Самошина Е.Н., канд. техн. наук, доц.¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОБЕТОНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ РАДИАЦИИ

Samoschin_ap@mail.ru

Для обеспечения радиационной защиты на объектах атомной энергетики одним из перспективных материалов является металлобетон, сочетающий свойства пластичных металлических матриц и каменного заполнителя. В процессе его изготовления возникает необходимость нагрева металлической матрицы до температуры плавления. При охлаждении металлобетонного изделия каркасного типа из-за различных коэффициентов температурного расширения, модулей упругости металлической матрицы и зёрен заполнителей, а также теплофизических свойств компонентов возникают внутренние напряжения. Эти напряжения, суммируясь с напряжениями от эксплуатационных воздействий и нагрузок, могут быть причиной снижения физико-механических свойств материала. В данной работе проведена оценка влияния соотношения модулей упругости заполнителя E_3 и матрицы E_m , а также степени наполнения материала (определяющей толщину прослойки вяжущего h) на величину и характер изменения внутренних напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях.

Ключевые слова: металлобетон, внутренние напряжения, модуль упругости.

В настоящее время разрабатываются все больше новых видов радиационно-защитных материалов, изделий и конструкций специального назначения на их основе, которые состоят из двух и более компонентов, отличающихся по своей природе. Одним из таких материалов является металлобетон. В работах [1–14] разработаны научные основы создания конструктивных и специальных металлобетонов. Однако в процессе их изготовления на основе существующих литейных технологий возникает задача однородного распределения заполнителя по объёму изделия и, следовательно, высокой однородности металлобетона. Решить эту задачу можно путём создания металлобетона каркасной структуры.

При охлаждении металлобетонного изделия каркасного типа из-за различных коэффициентов температурного расширения, модулей упругости свинцовой матрицы и зёрен заполнителей, а также теплофизических свойств компонентов возникают внутренние напряжения. Получаемые напряжения, складываясь с напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации от внешних воздействий и нагрузок, могут быть причиной снижения физико-механических свойств материала [15]. Поэтому учёт напряжений, возникающих в структуре материала особенно важен при проектировании композитов специального назначения, так как к таким материалам предъявляются повышенные требования по непроницаемости, трещиностойкости, массопо-

глощению и др. Оценка напряжённого состояния материала и определение влияния на него различных рецептурных и технологических факторов является важной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

В данной статье проведена оценка влияния соотношения модулей упругости матрицы E_m и заполнителя E_3 , а также степени наполнения материала (определяющей толщину прослойки вяжущего h) на величину и характер изменения внутренних напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях. В качестве модели принята структурная ячейка композиционного материала в виде сферического зерна, заключённого в твердеющую матрицу [16, 17]. Внутренние напряжения в металлобетоне возникают вследствие различных модулей упругости компонентов и коэффициентов линейного температурного расширения при снижении температуры или при возникновении усадки:

$$\Delta\varepsilon \pm \left[\frac{\sigma_r}{E_m} \cdot (1 - \mu_m) + \frac{\mu_m \cdot \sigma_t}{E_m} + \frac{P}{E_3} \cdot (1 - \mu_3) \right] = 0, \quad (1)$$

где σ_r , σ_t – внутренние напряжения в радиальном и тангенциальном направлении; μ_3 , μ_m – коэффициенты Пуассона зерна и матрицы; E_3 , E_m – модули упругости заполнителя и матрицы; $\Delta\varepsilon$ – разность деформаций; P – давление, возникающее на границе раздела фаз.

Значения σ_r и σ_t равны:

$$\sigma_r = \frac{\Delta\varepsilon \cdot \left(1 - \frac{v_f}{\eta}\right)}{\frac{1}{2E_m} \cdot \left[\left(2 \frac{v_f}{\eta} + 1\right) - \mu_m \left(4 \frac{v_f}{\eta} - 1\right)\right] + \frac{1}{E_3} \cdot \left(1 - \frac{v_f}{\eta}\right) \cdot (1 - 2\mu_3)} ; \tag{2}$$

$$\sigma_t = \frac{-\Delta\varepsilon \cdot \left(2 \frac{v_f}{\eta} + 1\right)}{\frac{1}{E_m} \cdot \left[\left(2 \frac{v_f}{\eta} + 1\right) - \mu_m \left(4 \frac{v_f}{\eta} - 1\right)\right] + \frac{2}{E_3} \cdot \left(1 - \frac{v_f}{\eta}\right) \cdot (1 - 2\mu_3)} , \tag{3}$$

где v_f – объёмная степень наполнения материала; η – максимальная плотность упаковки частиц наполнителя в объёме композита.

Результаты расчётов представлены в табл. 1, на рис. 1. Из представленных данных видно, что матрица испытывает как растягивающие, так и сжимающие напряжения. На величину этих

напряжений значительное влияние оказывают модули упругости матрицы и наполнителя, их соотношение, а также степень наполнения материала. Увеличение модуля упругости наполнителя (уменьшение соотношения E_m/E_3) приводит к росту внутренних напряжений в композите.

Таблица 1

Величина напряжений σ , возникающих в свинцовой оболочке

σ	v_f	Соотношение модулей упругости наполнителя									
		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура расплава 350 °C											
σ_r	0,38	-0,0323	-0,0336	-0,0350	-0,0365	-0,0382	-0,0400	-0,0420	-0,0442	-0,0466	-0,0494
σ_t		0,0338	0,0352	0,0366	0,0382	0,0399	0,0418	0,0439	0,0462	0,0488	0,0516
σ_r	0,50	-0,0260	-0,0269	-0,0278	-0,0288	-0,0299	-0,0310	-0,0323	-0,0336	-0,0350	-0,0366
σ_t		0,0418	0,0432	0,0446	0,0462	0,0479	0,0497	0,0517	0,0538	0,0562	0,0587
σ_r	0,59	-0,0291	-0,0299	-0,0308	-0,0317	-0,0327	-0,0337	-0,0348	-0,0360	-0,0373	-0,0386
σ_t		0,0636	0,0634	0,0637	0,0693	0,0714	0,0737	0,0761	0,0787	0,0815	0,0844
σ_r	0,64	-0,0280	-0,0286	-0,0294	-0,0301	-0,0309	-0,0317	-0,0326	-0,0336	-0,0345	-0,0356
σ_t		0,0776	0,0795	0,0815	0,0836	0,0858	0,0881	0,0905	0,0932	0,0959	0,0988
Температура расплава 400 °C											
σ_r	0,38	-0,1702	-0,1770	-0,1844	-0,1924	-0,2011	-0,2106	-0,2211	-0,2327	-0,2456	-0,2600
σ_t		0,1777	0,1848	0,1925	0,2009	0,2100	0,2199	0,2309	0,2430	0,2564	0,2714
σ_r	0,50	-0,1285	-0,1328	-0,1373	-0,1422	-0,1474	-0,1530	-0,1591	-0,1657	-0,1728	-0,1806
σ_t		0,2057	0,2125	0,2198	0,2276	0,2360	0,2450	0,2547	0,2653	0,2767	0,2892
σ_r	0,59	-0,0998	-0,1026	-0,1056	-0,1087	-0,1121	-0,1156	-0,1194	-0,1235	-0,1278	-0,1324
σ_t		0,2178	0,2239	0,2304	0,2373	0,2446	0,2524	0,2606	0,2695	0,2789	0,2891
σ_r	0,64	-0,0908	-0,0931	-0,0954	-0,0978	-0,1004	-0,1031	-0,1060	-0,1090	-0,1123	-0,1156
σ_t		0,2521	0,2582	0,2647	0,2715	0,2786	0,2862	0,2941	0,3026	0,3115	0,3209
Температура расплава 450 °C											
σ_r	0,38	-0,1787	-0,1858	-0,1936	-0,2020	-0,2111	-0,2211	-0,2322	-0,2443	-0,2579	-0,2730
σ_t		0,1864	0,1938	0,2018	0,2106	0,2201	0,2306	0,2421	0,2548	0,2686	0,2846
σ_r	0,50	-0,1371	-0,1416	-0,1465	-0,1517	-0,1573	-0,1633	-0,1698	-0,1768	-0,1844	-0,1928
σ_t		0,2192	0,2265	0,2342	0,2426	0,2515	0,2611	0,2715	0,2827	0,2949	0,3082
σ_r	0,59	-0,0977	-0,1004	-0,1033	-0,1064	-0,1097	-0,1131	-0,1169	-0,1208	-0,1251	-0,1296
σ_t		0,2130	0,2190	0,2253	0,2321	0,2392	0,2468	0,2549	0,2635	0,2728	0,2827
σ_r	0,64	-0,0885	-0,0906	-0,0929	-0,0953	-0,0978	-0,1005	-0,1033	-0,1062	-0,1094	-0,1127
σ_t		0,2353	0,2513	0,2580	0,2642	0,2712	0,2785	0,2863	0,2945	0,3032	0,3124

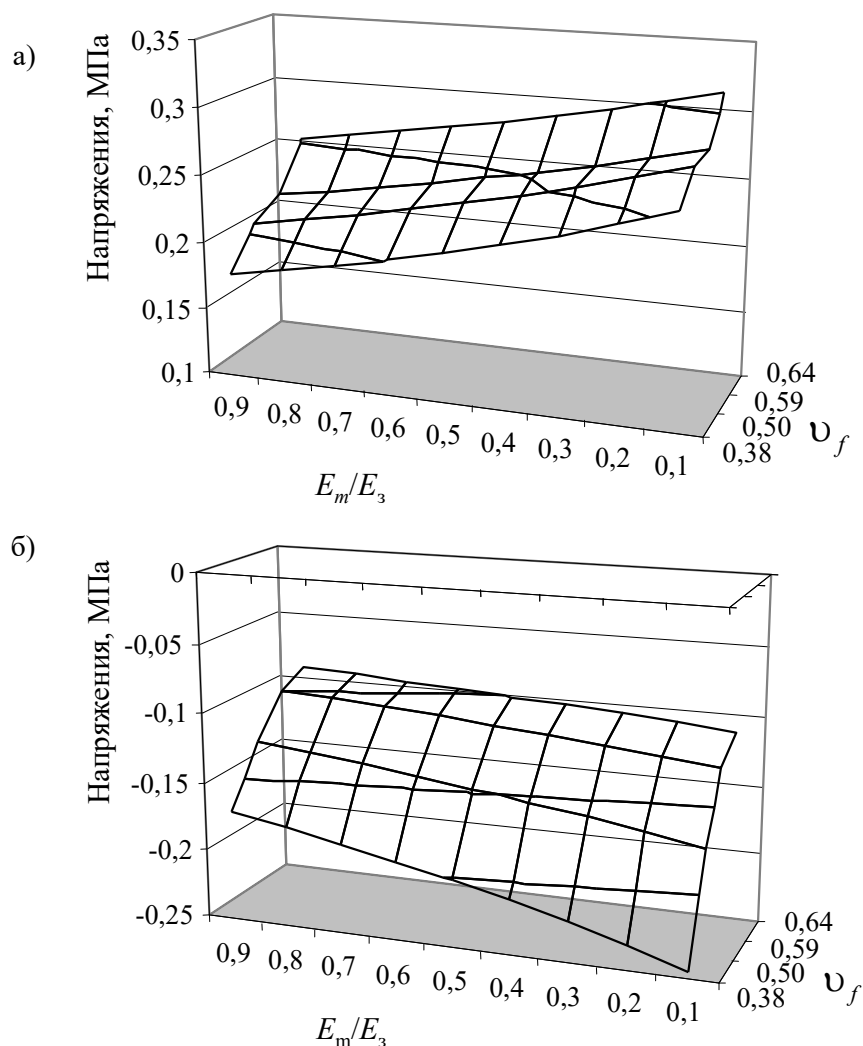


Рис. 1. Зависимость внутренних напряжений от объёмной степени наполнения U_f и соотношения модулей упругости матрицы и заполнителя E_m/E_3 : а) в тангенциальном направлении; б) в радиальном направлении

Изменяя степени наполнения материала и проведя анализ полученных данных можно отметить, что зависимость напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях имеет различный характер: внутренние напряжения в тангенциальном направлении увеличиваются, а в радиальном – уменьшаются (рис. 1). Анализ уровня внутренних напряжений показывает, что их величина значительно меньше прочности на разрыв свинца ($\sigma_{св} = 14...18$ МПа). Это позволяет прогнозировать формирование предлагаемого металлобетона без горячих трещин в структуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павленко В.И., Матюхин П.В. Основные аспекты разработки современных радиационно-защитных конструкционных металлокомпозиционных материалов // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 10. С. 85–86.

2. Матюхин П.В. Неорганический радиационно-защитный металлокомпозиционный материал строительного назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 9. С. 35–39.

3. Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Самойлова Ю.М. Использование оксидов тяжелых металлов для синтеза радиационно-защитных материалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-7. С. 1199–1202.

4. Матюхин П.В. Термостойкие полимерные композиты для нейтронной и гамма-защиты // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 9 (28). С. 39–40.

5. Matyukhin P.V. Theoretical preconditions of new kinds of nuclear protective metal composite materials development based on ferric and bismuth oxides capsulated into metallic aluminum matrix // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 2. С. 42.

6. Матюхин П.В., Бондаренко Ю.М., Павленко В.И. Синтез высокодисперсного наполнителя на основе гематитового концентрата из водных растворов ионов алюминия для радиационно-защитного металлокомпозиционного материала // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3 (74). С. 80–85.

7. Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Карнаухов А.А. Модифицированные железоксидные наполнители для конструкционной радиационной защиты атомных реакторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 209–213.

8. Матюхин П.В. Радиационно-защитный конструкционный композиционный материал // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 9 (28). С. 40–41.

9. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Куприева О.В., Самойлова Ю.М. Радиационно-защитные транспортные контейнеры отработавшего ядерного топлива на основе высоконаполненной полимерной матрицы и железорудного сырья КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 320–330.

10. Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Павленко В.И. Использование модифицированного железорудного сырья для получения конструкционной биологической защиты атомных реакторов // Успехи современного естествознания. 2015. № 9-3. С. 507–510.

11. Бондаренко Ю.М., Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Конструкционный радиационно-защитный металлокомпозиционный материал на основе алюмосодержащей матрицы и высокодисперсных оксидов тяжелых металлов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 120.

12. Самошин А.П. Каркасные металлобетоны для защиты от радиации Строительные материалы. 2008. № 9. С. 84–88.

13. Королев Е.В., Королева О.В., Самошин А.П., Смирнов В.А. Структура и свойства крупнопористых каркасов для радиационно-защитных материалов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1 (13). С. 308–314.

14. Королев Е.В., Самошин А.П., Смирнов В.А., Королева О.В., Гришина А.Н. Методики и алгоритм синтеза радиационно-защитных материалов нового поколения. Пенза, 2009, 132 с.

15. Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин Л.Н. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов: справочное пособие. М.: Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1968. 167 с.

16. Соломатов В.И., Хвастунов В.Л., Королев Е.В., Прошин А.П. Прогнозирование свойств строительных материалов на основе структурных моделей // Вестник волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук. Нижний Новгород, НГАСУ. 2000. С.121-130.

17. Королев Е.В., Еремкин А.И., Макридин Н.М., Смирнов В.А. Механика разрушения серных композитов // Оценка риска и безопасность строительных конструкций : сборник материалов Первой Международной научно-практической конференции. Т.1. Воронеж: ВГАСУ, 2006. С.64–70.

Samoshin A.P., Korolev E.V., Samoshina E.N.

INTERNAL VOLTAGES IN FORMING THE STRUCTURE OF METAL-CONCRETE FOR PROTECTION FROM RADIATION

To ensure radiation protection at nuclear power facilities, one of the promising materials is metal-concrete, combining the properties of plastic metal matrixes and stone aggregate. During the manufacturing process, it becomes necessary to heat the metal matrix to the melting point. With the cooling of a skeleton-type metal-skeleton product, internal stresses arise due to different coefficients of temperature expansion, elasticity moduli of the matrix and aggregate grains, and also thermophysical properties of the components. These voltages, combined with stresses from operational influences and loads, can be the reason for reducing the physico-mechanical properties of the material. In this paper, the effect of the ratio of the modulus of elasticity of the filler E_3 and the matrix E_m , as well as the degree of filling of the material (determining the thickness of the binder interlayer h), is estimated on the magnitude and nature of changes in internal stresses in the radial and tangential directions.

Key words: reinforced concrete, internal stresses, modulus of elasticity

Самошин Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства.
Адрес: Россия, 440028, Пенза, ул. Германа Титова, д. 28.
E-mail: Samoschin_ap@mail.ru

Королев Евгений Валерьевич, профессор, доктор технических наук, проректор.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Адрес: 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26
E-mail: korolev@npsnt.ru

Самошина Екатерина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки».
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства.
Адрес: Россия, 440028, Пенза, ул. Германа Титова, д. 28.
E-mail: Samoschin_ap@mail.ru