



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.3

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30

Оптимизация составов композиционных материалов на основе технологии полиструктурной интеграции гетерогенных материалов

А.А. Овчинников¹, Д.В. Обручев², И.Н. Данилов²

Александр Александрович Овчинников

¹ООО «СтройКом», Иваново, Российская Федерация,

nisigasa@mail.ru

Дмитрий Витальевич Обручев

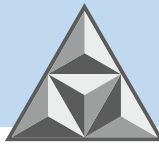
²ООО «Экспресс-Партнер», Иваново, Российская Федерация

nisigasa@mail.ru

Игорь Николаевич Данилов

²ООО «Экспресс-Партнер», Иваново, Российская Федерация

nisigasa@mail.ru



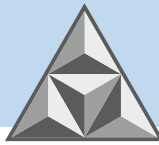
Статья направлена на решение вопроса оптимизации состава композита, разработанного на основе обобщений теоретических представлений о зависимости эксплуатационных характеристик композиционных материалов от их состава и структуры. Исходя из полиструктурной теории бетона, в статье формулируются положения о влиянии компонентов на различные структурные уровни композита, экспериментально доказывается возможность качественного управления свойствами материалов и характеристиками конечных объектов городской инфраструктуры на их основе. В статье рассмотрены существующие и перспективные методы создания вариатронных полиструктурных композиционных материалов. Приведены результаты экспериментов по подбору составов композита на основе представления о его структуре как сложной системе. Представлены результаты экспериментов по оптимизации состава композита, позволяющие обеспечить эффективную совместную работу элементов гетерогенного материала и рациональное управление свойствами конечного объекта городской инфраструктуры с учетом требований к условиям эксплуатации. Предложены технологические решения по производству объектов городской среды из разработанного композиционного материала.

Ключевые слова: строительные материалы, композиты, композиционные материалы, полиструктурная интеграция, полиструктурная теория бетона, бетон, вариатронная структура

Для цитирования:

Овчинников А.А., Обручев Д.В., Данилов И.Н. Оптимизация составов композиционных материалов на основе технологии полиструктурной интеграции гетерогенных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 1. С. 30-46. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30



RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30

Optimisation of composite material structure based on the technology of polystructural integration of heterogeneous materials

A.A. Ovchinnikov¹, D.V. Obruchev², I.N. Danilov²

Aleksandr A. Ovchinnikov

¹JSC "StroyCom", Ivanovo, Russian Federation

nisigasa@mail.ru

Dmitry V. Obruchev

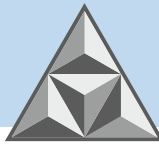
²JSC "Express-Partner", Ivanovo, Russian Federation

nisigasa@mail.ru

Igor N. Danilov

²JSC "Express-Partner", Ivanovo, Russian Federation

nisigasa@mail.ru



The article considers the problem of the composite structure optimization developed on the basis of general theoretical concepts about the dependence of the performance characteristics of composite materials on their composition and structure. Based on the poly-structural theory of concrete, the article formulates provisions on the influence of components on different structural levels of the composite and experimentally proves the possibility of qualitative control of material properties and characteristics of final urban infrastructure objects based on them. This article discusses existing and promising methods for creating variatropic polystructured composite materials. The paper presents the results of experiments on the selection of composite structure considering this particular structure as a complex system. Also the paper provides the experimental results on optimisation of composite structure. These results allow efficient cooperation of the heterogeneous material elements and rational management of the properties of the final object of the urban infrastructure, taking into account the requirements for operating conditions. The authors also propose the technological solutions for the production of environment objects made of the developed composite material.

Key words: construction materials, composites, composite materials, polystructural integration, polystructural theory of concrete, concrete, variatropic structure

For citation:

Ovchinnikov, A.A., Obruchev. D.V., Danilov, I.N. (2022) Optimisation of composite material structure based on the technology of polystructural integration of heterogeneous materials, *Smart Composite in Construction*, 3(1), pp. 30-46 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022 (In Russian)

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30



ВВЕДЕНИЕ

Современная городская среда формируется рядом объектов, включающих в себя арт-объекты – малые архитектурные формы, объекты сети уличного спорта – спортивные площадки, тренажеры, искусственные препятствия для паркура, детские площадки и иные элементы различной сложности и назначения. Такого рода объекты эксплуатируются в агрессивной городской среде, подвергаясь воздействиям не только солнца, влаги, температуры и ветра, но и пыли, автомобильных и промышленных выбросов, механическому воздействию и актам вандализма. Кроме того, само назначение объектов городской среды – быть эксплуатируемыми человеком – требует от них высокой эксплуатационной стойкости и минимальных затрат на поддержание в работоспособном состоянии [1-3].

Недостатками традиционных материалов, таких как металл, бетон, дерево или пластик, являются ограниченность возможностей применения и относительно низкая стойкость значительной части материалов к внешним агрессивным воздействиям. Также классические материалы плохо интегрируются между собой, что приводит к быстрой потере рабочих характеристик, в том числе декоративной выразительности и общей эстетичности изделия. Поэтому для обеспечения таких характеристик объекты городской среды предпочтительнее изготавливать из системы различных материалов или композиционных материалов [4, 5].

Высокие эксплуатационные качества объектов городской среды могут быть обеспечены применением высокотехнологичных композиционных материалов, объединяющих в себе свойства полимерных композитов и композитов на минеральной основе, отличающихся высокой прочностью и трещиностойкостью, низкой теплоемкостью и теплопроводностью, стойкостью к агрессивным воздействиям окружающей среды и, как следствие, значительной долговечностью. К таким материалам относятся композиты, полученные на основе рационального управления структурой на микро-, мезо- и макроуровне, состоящие из разнородных исходных компонентов, работающих совместно с синергетическим эффектом и формирующих комплекс новых свойств конечного объекта. Поэтому разработка композиционных материалов и технологии их полиструктурной интеграции для создания и организации производства объектов городской среды, малых архитектурных форм и арт-объектов является актуальной [6-8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Первоначальные этапы исследования, отраженные в ранее опубликованной статье [9], определили основные принципы управления структурой композита на разных уровнях. Исходя из полиструктурной теории бетона [10-12] были определены основные уровни композиционного материала, влияние их на общие и эксплуатационные свойства материала и свойства объектов – малых архитектурных форма (МАФ) из этого материала.

Проведенные исследования позволили получить композиционный материал, обладающий рядом необходимых для МАФ свойств: высокой прочностью при сжатии 46–49 Н/мм², истираемостью не более 0,55 г/см², коэффициентом линейного расширения 0,52 мм/м, теплоемкостью 1,14 кДж/(кг·°С) и теплопроводностью 0,65 Вт/(м·°С). Достигнутые характеристики композиционного материала достаточны для изготовления изделий, подвергающихся воздействию попеременного увлажнения–высыхания, замораживания–оттаивания, абразивному истиранию, механическим нагрузкам. Полученные характеристики соответствуют требованиям к конструкционному бетону для изделий капитальностью более



100 лет.

В целях совершенствования состава композита были проведены комплексные испытания разработанного материала, была разработана программа испытаний и согласно ей изготовлены и испытаны образцы – кубы с гранью 100 мм, балки с размерами 40x40x160 мм для стандартных испытаний.

Изготовление образцов для стандартных лабораторных испытаний осуществлялось согласно требованиям ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 13087-2018, ГОСТ 12730.1-78, ГОСТ 12730.4-78, ГОСТ 12730.3-78, ГОСТ 23250-78, ГОСТ 7076-99, ГОСТ 29167-91, ГОСТ 30459-2008.

Опытные образцы изготавливались из смеси с составом, включающим в себя портландцемент белый, ЦЕМ I 42,5Б, песок фракции 0,63, микрокальцит 30–60 мкм, редиспергируемый порошок ОРР Hydroflex 64, гиперпластификатор ПК-40, замедлитель схватывания НТФ, ускоритель твердения – нитрат кальция.

Опытные образцы изготавливались согласно требованиям п. 4.1 ГОСТ 10180-2012. В условиях закрытой лаборатории, при температуре воздуха 20–22 °С и относительной влажности 60–65% производился ряд опытных замесов компонентов в объеме по 15 литров за замес для изготовления партии по 6 образцов-кубов с гранью 100 мм или 15 балочек с размерами 40x40x160 мм.

Изготовленные таким образом лабораторные образцы-кубы и балки направлялись для испытания их характеристик – прочности при сжатии, истираемости, плотности, водопоглощения, линейных деформаций и теплотехнических характеристик, согласно разработанной программе испытаний. Результаты стандартных испытаний образцов композита представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики композиционного материала

Table 1. The main characteristics of the composite material

Свойство материала	Значение показателя образца	Среднее значение показателя
Плотность образца, кг/м ³	2199	2136,7
	2134	
	2129	
	2115	
	2126	
	2117	
Прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	46,3	46,6
	44.4	
	47.5	
	47	
	47,5	
	47,4	
Линейное расширение, %	0,0002	0,00052
	0,0005	
	0,0004	
	0,0008	
	0,0006	
	0,0006	
Истираемость, г/см ²	0,57	0,55
	0,55	
	0,52	
	0,56	



Свойство материала	Значение показателя образца	Среднее значение показателя
	0,54	
	0,53	
Теплоемкость, кДж/кг·°С	1.2	1,14
	1.15	
	1.18	
	1.05	
	1.12	
	1.15	
Теплопроводность, Вт/м·°С	0,67	0,65
	0,65	
	0,62	
	0,66	
	0,64	
	0,63	

Так как разрабатываемый композиционный материал предполагается к использованию для создания МАФ, то кроме основных физико-механических свойств изделия из этого материала должны обладать поверхностью такого качества, которое долговременно обеспечивает высокие эксплуатационные свойства изделия, в том числе органолептические и эстетические. Качество поверхности, включая ее способность сохранять цвет и фактуру, отталкивать воду, растворы солей, красящие растворы и т.п., зависит от ряда факторов, в том числе от водопоглощения материала. Регуляция водопоглощения осуществлялась путем управления средней плотностью бетона, его структурой и гидрофобными свойствами поверхности.

Таблица 2. Зависимость плотности материала от расхода добавки пеногасителя

Table 2. Dependence of the material density on the defoamer additive consumption

Расход	Плотность, г/см ³			
	Peramin DEFOAM 50PE	Axilat DF770 DD	ADEKA NATE B-213F	Д600
0	1,95	1,95	1,95	1,95
0,25	2,05	2,1	2,1	2,07
0,5	2,1	2,15	2,11	2,08
0,75	2,12	2,18	2,15	2,1
1	2,12	2,19	2,15	2,1

Для снижения открытой пористости, которая определяет водопоглощение, а также общей пористости, от которой зависит морозостойкость, применялись добавки, обеспечивающие резкое повышение плотности бетона путем вытеснения воздуха. Были применены пеногасители различного происхождения и найдены их оптимальные концентрации. Результаты представлены в таблицах 2 и 3, на рисунках 1 и 2.

В результате исследований установлено, что максимальная плотность композита при минимальном водопоглощении достигается при значении для наиболее эффективной добавки Axilat DF770 DD 0,75% по массе вяжущего.

Однако такой состав остается с относительно высоким водопоглощением – до 2,5%, что не может считаться гидрофобным составом. Поэтому была проведена корректировка состава путем введения гидрофобизирующей добавки – стеарата цинка (рис. 3).

В результате получены материалы и изделия на их основе с характеристиками: класс



композита по прочности при сжатии варьируется в диапазоне $B25 \pm 5\%$; плотность – $2,1-2,2 \text{ т/м}^3$; водопоглощение – менее $0,7-0,5\%$; истираемость – $0,5-0,7 \text{ г/см}^2$. Цвет бетона – максимально приближенный к RAL 1013, поверхность – полуматовая, гидрофобная, гладкая, однородная, без разводов и высолов, без зернистости.

Таблица 3. Водопоглощение материала в зависимости от расхода добавки пеногасителя

Table 3. Water absorption of the material depending on the defoamer additive consumption

Расход	Водопоглощение, % по массе			
	Peramin DEFOAM 50PE	Axilat DF770 DD	ADEKA NATE B-213F	Д600
0	4	4	4	4
0,25	3,5	3,2	3,5	3,8
0,5	3,2	2,8	3,2	3,6
0,75	3	2,5	2,8	3,4
1	2,8	2,5	2,7	3,5

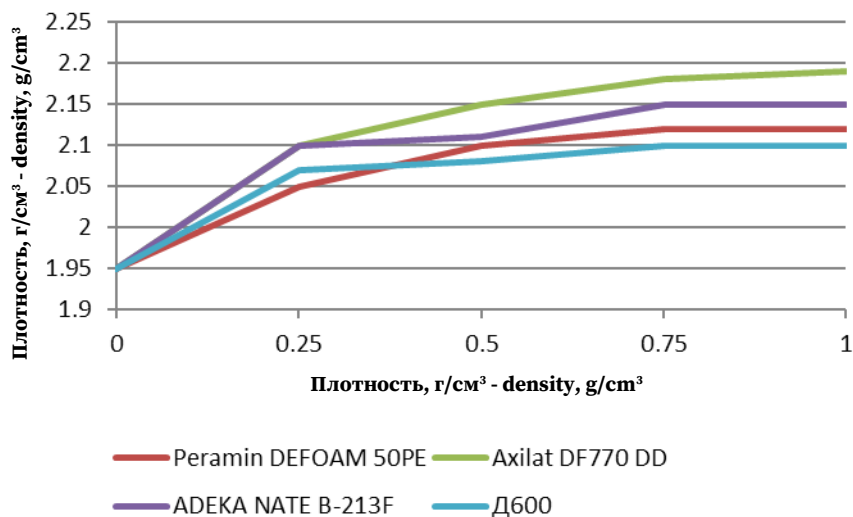


Рис. 1. Зависимость плотности материала от расхода добавки пеногасителя

Fig. 1. Dependence of the material density on the defoamer additive consumption

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИСТРУКТУРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

Основными методами разработки, оптимизации и исследования композиционного материала для технологии полиструктурной интеграции гетерогенных систем является проведение экспериментов согласно действующим нормативам. Однако подбор состава сырьевой смеси композита должен включать в себя и отдельную разработку методов модификации смеси, исследование ее свойств, а также оптимизацию структуры материала, что значительно увеличивает число экспериментов.

Для повышения эффективности проведения исследовательских и оптимизационных экспериментов применялись методы математического планирования и статистического анализа данных [13, 14]. Математической моделью выступал полином первого или второго порядка. Анализ полинома позволяет оптимизировать состав композита путем установления экстремумов функции [15-17].

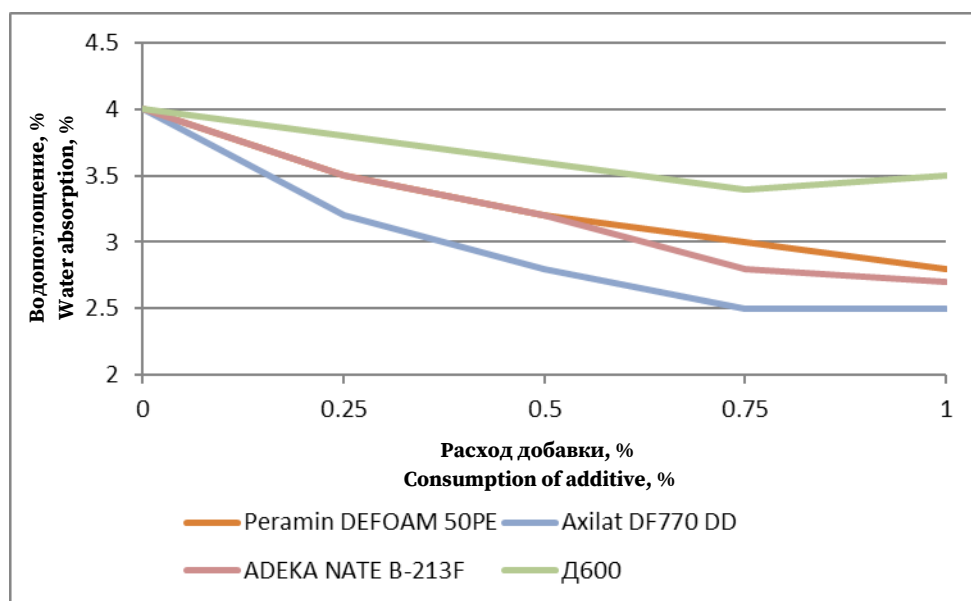


Рис. 2. Водопоглощение материала в зависимости от расхода добавки пеногасителя

Fig. 2. Water absorption of the material depending on the defoamer additive consumption

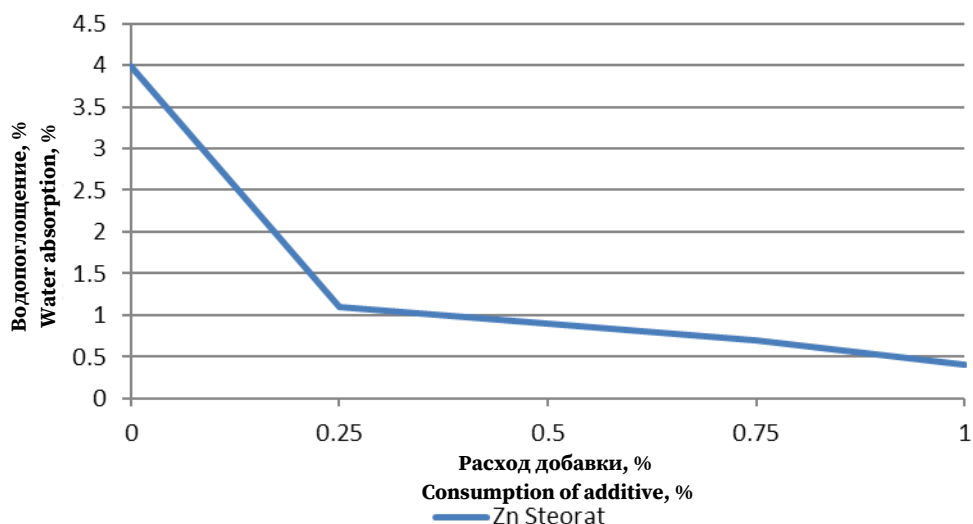


Рис. 3. Зависимость водопоглощения от расхода добавки гидрофобизатора

Fig. 3. Dependence of water absorption on the hydrophobizer additive consumption

Исследования для оптимизации состава композиционного материала проводились с применением D-оптимальных планов типа 2^n+2n+1 . Значимость коэффициентов уравнения устанавливали по критерию Стьюдента. Адекватность полученных математических моделей проверяли по критерию Фишера.

Для композиционного материала, применяемого для создания МАФ, эксплуатируемых в условиях городской среды, кроме архитектурно-художественной выразительности, которая обеспечивается качеством поверхности и цветом, важнейшим критерием оптимизации является прочность. От прочности материала зависят эксплуатационные параметры конструкции, в том числе долговечность. В свою очередь, прочность формируется в результате оптимизации не только состава смеси, но и ее технологических параметров на стадии формования и твердения. Поэтому получение высокоподвижной, самоуплотняющейся бетонной смеси является важным фактором в получении плотной и



прочной структуры композита.

Поликарбоксилатный гиперпластификатор, применяемый для исследований, имеет максимальную разжижающую способность, таким образом обеспечивая значительное снижение водоцементного отношения в бетонной смеси, что приводит к возможности повышения прочностных показателей композита без увеличения расхода цемента. Кроме того, гиперпластификатор влияет на скорость и направленность протекания реакций гидратации и, как следствие, на результат этих реакций – синтез низкоосновных гидросиликатов кальция – тоберморита и ксонотлита, формирующих максимальную прочность.

Однако простое введение карбоксилатного гиперпластификатора сопровождается значительным воздухововлечением и даже пенообразованием. Это может приводить к сегрегации смеси, разуплотнению структуры и появлению дефектов на поверхности. Для компенсации негативного воздействия и дополнительного уплотнения бетонной смеси в состав композита был введен пеногаситель. Пеногаситель благодаря изменению поверхностного натяжения водного раствора смеси обеспечивает коалесценцию пузырьков воздуха, вовлеченного в смесь.

Таким образом, в качестве критериев оптимизации состава были приняты подвижность бетонной смеси и ее прочность. Оптимальные с этой точки зрения составы также испытывались на истираемость, определялся коэффициент линейного расширения, а также устанавливались значения теплоемкости и теплопроводности.

На первом этапе для обеспечения максимальной прочности оптимизировалось соотношение минерального вяжущего вещества и наполнителя при стабильном расходе песка относительно смеси вяжущего и муки. Результат моделирования представлен на рис. 4.

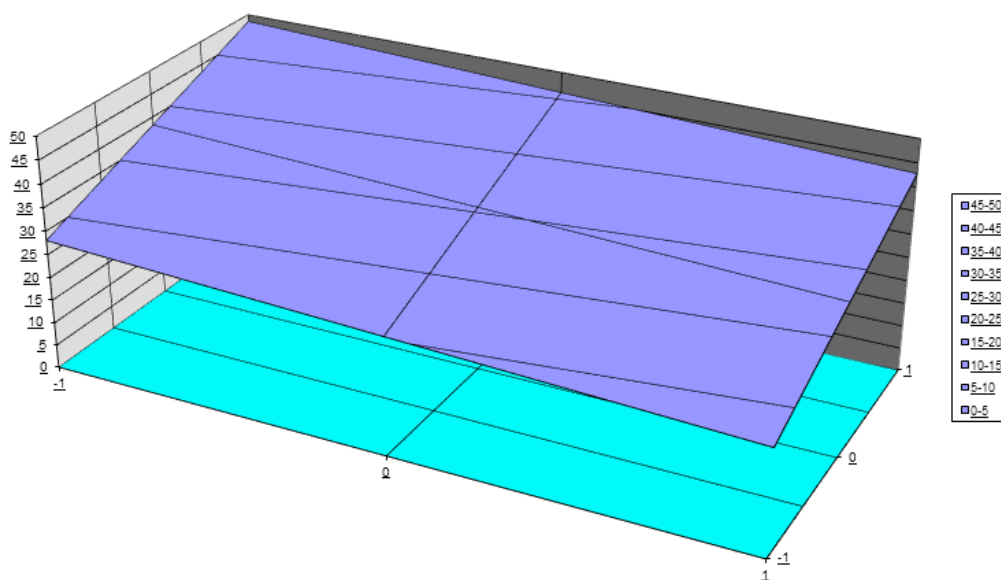


Рис. 4. Зависимость прочности от соотношения вяжущего и наполнителя

Fig. 4. Dependence of strength on the binder/filler ratio

Уравнение регрессии, адекватно описывающее закономерности влияния соотношения компонентов на прочностные характеристики композита, имеет линейный вид:

$$Y = 35.4 + 10.2x_1 - 2.85x_2.$$



Результат моделирования показывает, что наиболее значимое влияние оказывает расход цемента x_1 , при этом изменение переменной на значение шага интервала варьирования вверх прибавляет композиту 10 МПа прочности. Обратным эффектом обладает расход наполнителя, x_2 , но с меньшим параметром – 2,85 МПа.

Следующим этапом оптимизации было определение наилучшего соотношения пластификатора и пеногасителя в системе, так как увеличение расхода пеногасящей добавки приводит к резкому снижению подвижности смеси и, как следствие, ее формуемости, а значит, к ухудшению качества поверхности материала. Пластификатор должен компенсировать эти недостатки, однако его влияние носит нелинейный характер, в связи с чем необходимо перейти к плану второго порядка. Результат моделирования представлен на рис. 5.

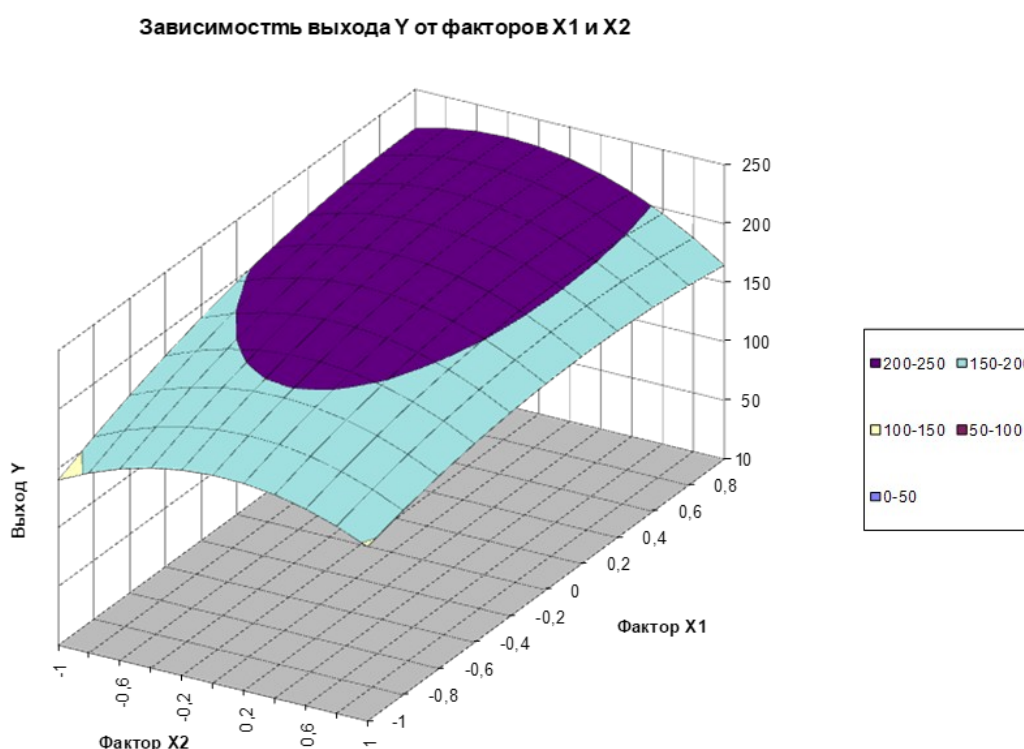


Рис. 5. Зависимость подвижности смеси от расходов гиперпластификатора и пеногасителя
Fig. 5. Dependence of the mixture mobility on the hyperplasticizer and defoamer consumption

В результате моделирования получено адекватное уравнение, описывающее зависимость подвижности смеси от расходов гиперпластификатора и пеногасителя:

$$Y = 218.6 + 23.3x_1 - 11.2x_2 - 18.8x_1^2 - 32.3x_2^2 - 15x_1x_2.$$

Уравнение носит нелинейный характер, все его коэффициенты значимы. Это означает, что при оптимизации необходимо учитывать взаимодействие компонентов между собой. Дифференцируя уравнение в частных производных, находим, что экстремум лежит на границе факторного пространства по оси расхода гиперпластификатора x_1 , соответствующего концентрации ПК-40 0,8%, и при расходе пеногасителя x_2 , равном 0,6%. Такое соотношение компонентов обеспечивает максимальную подвижность смеси при сохранении качественной поверхности и максимальной плотности композита.

Характеристики оптимизированного материала представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Значения технологических показателей оптимизированного композита**Table 4.** Values of technological indicators of the optimized composite

Уровень структуры композита	Свойства композита, формирующиеся на уровне	Значение
Микроуровень	Прочность, Н/мм ²	37,3-46,6
	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,65
	Гидрофобность (водопоглощение), %	менее 2%
Мезоуровень	Истираемость, г/см ²	0,55
	Линейные деформации, мм/м	0,052
Макроуровень	Плотность, г/см ³	0,7-2,1
	Теплоемкость, кДж/(кг·°С)	1,0-1,14
	Долговечность, лет	30-35

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИСТРУКТУРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ

Исходя из требований к изделию, его массогабаритных и физико-механических характеристик, а также специфики разработанного композиционного материала, были проанализированы существующие способы изготовления малых архитектурных форм и иных объектов городской среды.

В значительной мере способ изготовления объектов определяется основными используемыми при этом конструкционными материалами. Так, для металлических конструкций с различного вида отделкой используют стандартный металлический прокат, объединенный после гнутья или правки в единую систему при помощи сварных или болтовых соединений. Технология его производства по большей мере сводится к резке проката на элементы изделия, их сборке и покраске с последующим монтажом деталей из деревянных, пластиковых или иных материалов. Монтаж изделия может производиться как в условиях предприятия, так и непосредственно на уличной площадке в городе. Деревянные конструкции и МАФ из них – наиболее простые по технологии изготовления – требуют лишь распиловки, нагельного соединения и окраски. Бетонные МАФ отличаются более сложной технологией изготовления, т.к. не являются объединением в конструкцию стандартных элементов, промышленно изготовленных на существующих предприятиях. Они уже требуют специальной опалубки, специфических условий изготовления отдельных элементов и последующего их объединения в конструкцию.

Более сложные малые архитектурные формы объединяют в себе вышеперечисленные материалы и конструкции из них, еще более усложняя технологию производства.

Разработанный композит является материалом с интегрированными в него иными видами элементов, обеспечивающих такие свойства изделий, которые, несмотря на воздействие агрессивных сред, значительно увеличивают срок нормативной эксплуатации изделий при снижении эксплуатационных затрат. Технология производства многокомпонентных композиционных систем представляет собой интеграцию компонентов посредством минерально-органического связующего, имеющего характеристики, компенсирующие разность линейных и объемных температурных деформаций элементов конструкции.

Технология решает актуальные проблемы совместной работы разнородных компонентов



в единой конструкции в отличие от традиционных изделий не за счет болтовых, нагельных и т.п. соединений механического типа, а за счет формирования единого полиструктурного композита. Такая система обеспечивает работу изделия как единого целого, превращаясь из системы отдельных элементов, объединенных дискретными связями, в единый материал.

Разработанный композиционный материал относится к искусственным камнеподобным материалам, полученным в результате твердения рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси химически активных и инертных материалов. Такие системы способны в результате физико-химических превращений – за счет гидратации клинкерных минералов вяжущего и полимеризации органического компонента, в обычных физических условиях (при комнатной температуре и влажности) переходить из вязко-подвижного состояния в твердое с образованием искусственного камня.

Поэтому первым этапом разработки технологии производства является создание такой конструкционной формы изделия и ее массогабаритных параметров, которые бы позволяли изготовить изделие путем его отливки из вязко-пластичной массы. Ее особенностью является наличие не только силового арматурного каркаса, но и интегрированных непосредственно при производстве элементов, создающих вариатропную структуру изделия или являющихся элементами отделки.

Опалубка для отливки таких изделий не должна иметь «закрытых» мест, т.е. пространств, не имеющих доступа к верхнему открытому пространству опалубки. Иначе в таких местах произойдет защемление воздуха и не отформируется изделие надлежащего качества. Также форма должна иметь минимум поверхностей с отрицательным углом откоса – там также защемляется воздух и не происходит должного уплотнения смеси. Сама форма должна иметь достаточную конструктивную прочность для удержания формы смеси, арматурного каркаса и закладных изделий. Кроме того, материал формы должен иметь минимальную адгезию к композиционному материалу.

Следующим этапом разработки технологии являлось определение технологических параметров производства смеси, формования изделий и режимов его твердения. В этом отношении производство разработанного композиционного материала мало чем отличается от традиционного бетонного производства, за исключением большей номенклатуры компонентов и более жестких требований к культуре производства. Сущность технологии сводится к следующему: на склады предприятия поставляются компоненты смеси. Поставки осуществляются в виде фасованных в различную тару компонентов, которые хранятся в соответствии с требованиями к ним. Песок поставляется просушенным и фракционированным. Дозирование компонентов происходит объемным методом для жидких компонентов и весовым для сухих с точностью до 0,1%. Смешение происходит непосредственно перед формованием в смесителе принудительного типа. Режим перемешивания зависит от типа смесителя, в наиболее общем случае перемешивание длится до 20 минут. Формование изделий производится путем вибрационного воздействия на смесь, залитую в один прием в заранее подготовленную – очищенную, смазанную и оснащенную арматурным каркасом с закладными деталями форму, до появления явления водоотделения на открытой поверхности изделия. Могут применяться глубинные вибраторы промышленного типа, либо виброплощадки с частотой колебаний от 60 Гц и амплитудой 0,1-0,3 мм. Опробованные режимы обеспечивают достаточную степень уплотнения смеси.

Режим твердения подбирался исходя из соображений минимизации затрат на его интенсификацию. Так как композит содержит добавки – ускорители твердения, то исследовалась интенсивность набора прочности по времени выдержки изделий в нормальных физических условиях. Скорость набора прочности приведена на рис. 6.

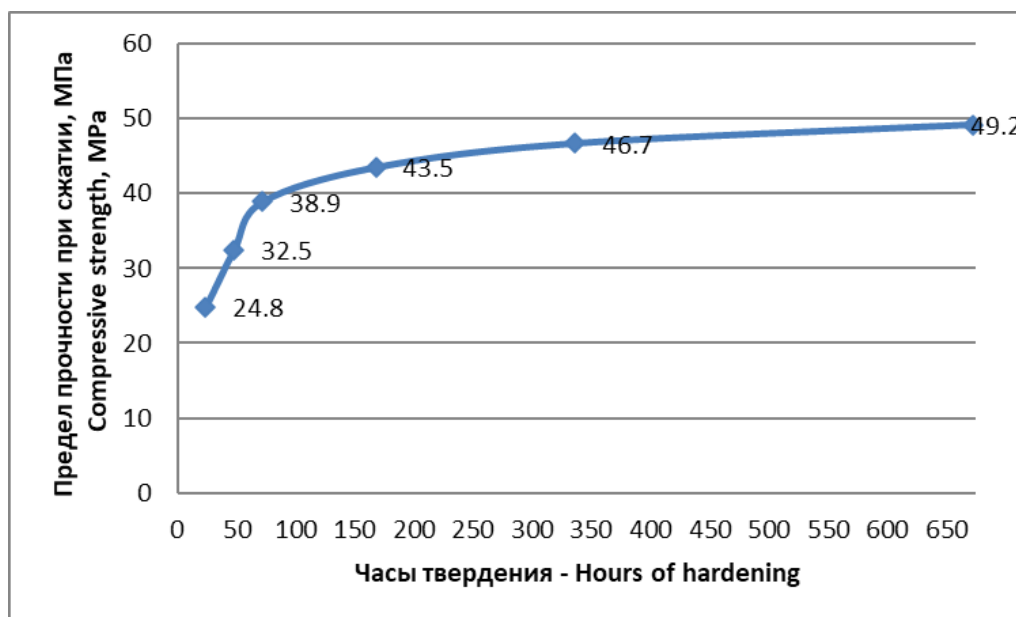


Рис. 5. Зависимость подвижности смеси от расходов гиперпластификатора и пеногасителя

Fig. 5. Dependence of the mixture mobility on the hyperplasticizer and defoamer consumption

Из анализа интенсивности набора прочности можно утверждать, что распалубку можно производить на третьи сутки, когда изделие набирает более 70% прочности. После распалубки изделие требует доводки путем шлифовки верхнего слоя, удаления наплывов, ремонта сколов, а также очистки закладных изделий. После установки дополнительных элементов изделия (если таковые требует дизайн) изделие может отправляться на склад готовой продукции или потребителю.

Таким образом, разработана технология, объединяющая на микроуровне процессы синтеза минералов из щелочных насыщенных ионами растворов и полимеризацию органических сополимеров, с созданием органо-минеральной матрицы композита. На мезоуровне технология обеспечивает возможность направленной многомерной ориентации элементов каркаса композита для обеспечения вариативности свойств по заданным направлениям. На макроуровне разработанная технология позволяет интегрировать в основной состав материала изделий композиты иной природы, обеспечивающие общую эстетическую выразительность и экологичность изделий для формирования городской среды, при этом внедренный элемент становится неотъемлемой частью материала, обеспечивающей их совместную работу как единого целого. Объединение в одной технологической цепочке процессов формирования свойств композита на трех структурных уровнях обеспечит уникальную возможность получения материалов и изделий из них с самым широким спектром свойств – от плотных тяжелых до сверхлегких конструктивных, обладающих при этом высокой эстетической выразительностью, разнообразием цвета, возможностью светопропускания, а также низкой теплопроводностью и теплоемкостью. Высокая стойкость к агрессивным воздействиям городской среды обеспечит низкие эксплуатационные затраты на поддержание рабочего состояния изделий, что позволит снизить в 1,5-2 раза затраты на обновление инфраструктуры городской среды.



ВЫВОДЫ

Таким образом, научно обоснована возможность изготовления высокопрочных цементно-органических декоративных композитов из мелкого заполнителя, с тонкими фракциями песка разного генезиса, с активными минеральными добавками, придающими высокую художественную выразительность композиту. Установлены основные закономерности формирования свойств композиционного материала в виде численных уравнений. Установлены физико-химические процессы минералогического и структурного преобразования композита в процессе синтеза новообразований и формирования структуры.

В ходе реализации поставленных задач было осуществлено следующее:

- определены основные факторы, влияющие на физико-механические характеристики композиционных материалов в заданных условиях эксплуатации, а также технологические факторы их производства;
- разработаны принципы повышения эффективности гетерогенного композита путем целенаправленного регулирования его структуры и применения инновационных методов сопряжения элементов структуры на микро-, мезо- и макро- уровне;
- установлены закономерности формирования основных эксплуатационных характеристик материала для изделий, эксплуатирующихся в условиях агрессивного воздействия факторов городской среды;
- определены методы и технологические параметры модификации составов, структуры и технологии производства для решения проблемы надежности и безопасности изделий из гетерогенного композита;
- разработаны экспериментальные составы и подобраны наиболее эффективные компоненты для производства композита;
- оптимизированы составы композиционных материалов для технологии полиструктурной интеграции по результатам испытаний образцов композиционных материалов;
- разработана технология полиструктурной интеграции гетерогенных композиционных материалов для спроектированных малых архитектурных форм.

Цель и задачи, поставленные в работе, достигнуты и полностью решены в ходе исследования: в результате получен вариатропный по структуре композиционный материал, объединяющий в себе свойства полимерных композитов и композитов на минеральной основе, отличающийся высокой прочностью – 45–60 МПа, низкой теплоемкостью – 1 кДж/(кг·°С) и теплопроводностью – 0,5 Вт/(м·°С), плотностью 0,8–2,2 г/см³, истираемостью 0,5–0,7 г/см²; с коэффициентом линейного расширения 0,2–0,4 мм/м; светостойкостью по DIN EN438 Часть 2-16 – 6-7 и средним сроком службы при эксплуатации в городской среде 35–50 лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. МГСН 1.02-02 / ТСН 30-307-2002 Нормы и правила проектирования комплексного благоустройства на территории города Москвы (с изм. от 19 августа 2003 г., 11 июля 2006 г.).
2. **Силкина М.А.** Визуальные ориентиры в архитектурной среде // *Наука, образование и экспериментальное проектирование: тезисы докладов Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, 6-10 апреля 2015 г.* М.: МАРХИ, 2015. С. 417-418.



3. **Скураатовский Г.М.** Искусство архитектурного пропорционирования. Новосибирск: Наука: Сибирское предприятие РАН, 1997. 184 с.
4. **Помазкин А.И., Кравченко В.А., Кучина К.А., Литвинцев М.К., Путых А.В., Успенских А.В.** Технологические и финансовые преимущества композиционных материалов из натурального сырья // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2019. Т. 9, № 5А. С. 335-343.
5. **Хозин В.Г.** Полимеры в строительстве – реальные границы и перспективы эффективного применения // *Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал*. 2014. № 1(1). С. 9-26. URL: <https://polymer.kgasu.ru/files/N1-1-2014-vypusk-17.03.pdf>
6. **Боженев П.И.** О формировании технических характеристик полидисперсных искусственных материалов // *Строительные материалы*. 1992. № 4. С. 20-24.
7. **Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М.** Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Киев: Будівельник, 1991. 136 с.
8. **Дворкин Л.И.** Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах // *Изв. вузов. Строительство и архитектура*. 1988. № 9. С. 53-57.
9. **Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Danilov I.N.** Composite materials based on polysturctural integration of heterogeneous materials. *Smart composite in construction*. 2021. V. 2, no 3. P. 21-31.
10. **Соломатов В.И.** Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // *Изв. вузов. Строительство*. 1985. № 8. С. 58-64.
11. **Соломатов В.И., Выровой В.Н., Бобрышев А.Н. и др.** Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Ташкент: ФАН, 1991. 344 с.
12. **Королев Е.В., Баженов Ю.М., Смирнов В.А.** Строительные материалы вариатропно-каркасной структуры. М.: МГСУ, 2011. 304 с.
13. **Налимов В.В.** Теория эксперимента // *Новые идеи в планировании эксперимента*. М.: Наука, 1969. С. 24-36.
14. **Налимов В.В., Чернова Н.А.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.
15. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 282 с.
16. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений). М.: Наука, 1969. 511 с.
17. **Финни Д.** Введение в теорию планирования экспериментов. М.: Наука, 1970. 288 с.

Поступила в редакцию 10.03.2022

Одобрена после рецензирования 17.03.2022

Принята к опубликованию 23.03.22

REFERENCES

1. MGSN 1.02-02 / ТСН 30-307-2002 Norms and rules for the design of complex landscaping on the territory of the city of Moscow (as amended on August 19, 2003, July 11, 2006) (in Russian).
2. **Silkina, M.A.** (2015) Visual landmarks in the architectural environment, *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie: tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy*



- konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodyh uchenykh i studentov, April 6-10, 2015. M.: MARHI, pp. 417-418 (in Russian).*
3. **Skuratovskij, G.M.** (1997) *The Art of Architectural Proportionation*. Novosibirsk: Nauka: Sibirskoe predpriyatie RAN (in Russian).
 4. **Pomazkin, A.I., Kravchenko, V.A., Kuchina, K.A., Litvintsev, M.K., Putykh, A.V. & Uspenskikh, A.V.** (2019) Technological and financial advantages of composite materials from natural raw materials, *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*, 9(5A), pp. 335-343 (in Russian).
 5. **Hozin, V.G.** (2014) Polymers in construction – real boundaries and prospects for effective use, *Polimery v stroitel'stve: nauchnyj Internet-zhurnal*, 1(1), pp. 9-26 [online]. Available at: <https://polymer.kgasu.ru/files/N1-1-2014-vypusk-17.03.pdf> (in Russian).
 6. **Bozhenov, P.I.** (1992) On the formation of technical characteristics of polydisperse artificial materials, *Stroitel'nye Materialy*, 4, pp. 20-24 (in Russian).
 7. **Dvorkin, L.I., Solomatov, V.I., Vyrovoy, V.N. & Chudnovskij, S.M.** *Cement concretes with mineral fillers*. Kiev: Budivel'nik, 1991 (in Russian).
 8. **Dvorkin, L.I.** (1988) Effect of active fillers in plasticized cement concretes, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Stroitel'stvo i arhitektura*, (9), pp. 53-57 (in Russian).
 9. **Ovchinnikov, A.A., Obruchev, D.V. & Danilov, I.N.** (2021) Composite materials based on polysturctural integration of heterogeneous materials, *Smart composite in construction*, 2(3), pp. 21-31.
 10. **Solomatov, V.I.** (1985) Development of the polystructural theory of composite building materials, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Stroitel'stvo*, (8), pp. 58-64 (in Russian).
 11. **Solomatov, V.I., Vyrovoy, V.N., Bobryshev, A.N. et al.** (1991) *Polystructural theory of composite building materials*. Tashkent: FAN (in Russian).
 12. **Korolev, E.V., Bazhenov, Yu.M. & Smirnov, V.A.** (2011) *Building materials of variatropic-frame structure*. M.: MGSU (in Russian).
 13. **Nalimov, V.V.** (1969) 'Theory of experiment' in Nalimov, V.V. (Ed.) *New ideas in experiment planning*. M.: Nauka, pp. 24-36 (in Russian).
 14. **Nalimov, V.V. & Chernova, N.A.** (1965) *Statistical methods for planning extreme experiments*. M.: Nauka (in Russian).
 15. **Adler, Yu.P., Markova, E.V. & Granovskij, Yu.V.** (1971) *Experiment planning while searching for optimal conditions*. M.: Nauka (in Russian).
 16. **Smirnov, N.V. & Dunin-Barkovskij, I.V.** (1969) *Probability Theory and Mathematical Statistics course (for technical applications)*. M.: Nauka (in Russian).
 17. **Finni, D.** (1970) *Introduction to the theory of experiment planning*. M.: Nauka (in Russian).

Received 10.03.2022

Approved after reviewing 17.03.2022

Accepted 23.03.22