



В.А. Езерский

Белостокский технический университет

Н.В. Кузнецова, А.Д. Селезнев

Тамбовский государственный технический университет

МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Для сравнительной оценки качества многокомпонентных композитов с использованием техногенных отходов предлагается использовать метод многокритериального сравнительного анализа. Рассматриваются несколько вариантов составов смесей композитов с использованием добавок и отходов цементно-стружечных плит, для каждого из которых определен набор свойств – критериев оценки. Практическое использование метода многокритериального анализа для технико-экономической оценки композиционных материалов позволило выявить лучший вариант состава по единственному синтетическому показателю, составить упорядоченный список вариантов состава по качеству. При выделении приоритетов для группы критериев оценки, отражающих значимость конкретных показателей материалов, возможно определение лучшего варианта в соответствии с выбранными приоритетами. Предлагаемый метод оценки качества позволяет существенно экономить время на поиск оптимального варианта и повысить объективность оценки.

Цементные композиты, техногенные отходы, добавки, отходы производства цементно-стружечных плит, многокритериальный сравнительный анализ, синтетический показатель качества.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития производства строительных материалов является получение композитов с заданными физико-механическими свойствами при минимизации затрат [7]. Снижение потребления цемента, природных заполнителей и энергозатрат при производстве цементных композитов с сохранением их качественных показателей достигается при расширении сырьевой базы, использовании добавок, внедрении новых технологических приемов подготовки компонентов.

Повышение экономической эффективности производства цементных композитов наблюдается при использовании в качестве компонентов смесей техногенных отходов. Частичная замена в составе цементных смесей природных компонентов (мелкого и крупного заполнителей) на техногенные отходы различной гидравлической активности и дисперсности совместно с применением химических добавок позволяет снизить себестоимость продукции.

Проектирование составов многокомпонентных композитов с использованием техногенных отходов основывается на количественном учете взаимосвязей показателей в системе состав – структура – свойство. При этом свойства композитов связаны с соответствующими параметрами структуры, которые учитывают качественные и количественные особенности его матрицы (цементного камня) и многокомпонентного заполнителя, их взаимодействие. Для целенаправленного формирования определенной структуры композита разрабатываются соответствующие рецептуры смесей, характеризующиеся составом и соотношением компонентов, параметрами и условиями технологических процессов производства, обеспечивающие в итоге комплекс требуемых свойств материала.

В качестве основного показателя качества цементных композитов рассматривается его прочность на сжатие, поскольку считается, что прочность определяет и другие свойства бетона (прочность на изгиб, плотность). В случае необходимости нормирования других показателей качества (морозостойкости, водопоглощения и др.) задача выбора оптимального состава значительно усложняется. Помимо физико-механических параметров в большинстве случаев требуется учет экономических и экологических показателей производства, доступности компонентов, транспортных расходов. В некоторых случаях оптимальным фактором является расход добавок, так как при оптимальной их дозировке можно достичь минимального расхода вяжущего. Для различных целей, например максимальная утилизация техногенных отходов, минимальный расход вяжущего, минимальная стоимость материала, условия оптимальности будут различаться. При этом составы цементных смесей, отвечающие принятым условиям оптимальности, также будут различными.

Сравнительная оценка композитов с использованием техногенных отходов основывается на сравнении показателей составов без дополнительных составляющих и многокомпонентных составов, однако такое сравнение не позволяет в полной мере оценить эффективность введения отходов в состав смесей, так как требуется сравнение множества строительно-технических и экономических показателей, имеющих различные значения для нескольких составов [2].

На основании используемых в практике методов сравнительной оценки эффективности применения отходов в производстве строительных материалов крайне сложно выполнить объективную комплексную оценку конечной продукции, так как все они имеют существенные недостатки: возможность учета только ограниченного количества критериев, трудоемкость их определения, расчет эффективности по какому-

либо основному показателю (экономический, экологический), сравнение коэффициентов эффективности компонентов, сложность сбора исходных данных, расчета и оценки [3].

На основе лабораторных исследований удастся подобрать составы с использованием техногенных отходов, обеспечивающие высокие показатели отдельных качеств бетонов, однако в большинстве случаев затруднительно определить и выбрать окончательный и наилучший состав материала. Часто в стороне остаются варианты, которые характеризуются лучшими сочетаниями показатели качества – стоимость, показатели качества – технологичность, экологичность – транспортные расходы, чем выбранные по одному самому лучшему показателю из числа анализируемых.

В такой ситуации возникает потребность в инструментальной оценке вариантов составов по многим критериям. Для сравнительной оценки качества многокомпонентных цементных композитов возможно использование метода многокритериального сравнительного анализа. Использование вычислительного инструмента, задачей которого стал бы анализ информации о качестве отдельных вариантов состава материала, может значительно упростить процесс выбора наилучших вариантов составов и повысить объективность оценки качества.

Целью данного исследования является разработка на основе использования одного из методов многокритериального сравнительного анализа инструментального подхода к оценке качества вариантов состава цементного композиционного материала с использованием отходов производства цементно-стружечных плит (ЦСП). Данный вид отходов образуется в значительном количестве на предприятии «Тамак» (г. Тамбов) – около 5,5 тыс. м³ в год [6].

1. Выбор и обоснование математического метода

Сравнительная оценка качества вариантов состава смесей цементного композита с использованием техногенных отходов предполагает учет множества факторов, которые в итоге определяют свойства предлагаемого материала. Учет всех факторов при выборе окончательного варианта весьма проблематичен, так как анализ большого числа критериев затрудняет объективную оценку. Решение проблемы может быть облегчено при использовании вычислительных алгоритмов и инструментов, которые объективно характеризуют качества вариантов с учетом предпочтений, закладываемых на этапе создания материала.

В качестве вычислительного инструмента для оценки качества вариантов состава смесей цементных композиционных материалов могут использоваться методы многофакторного и многокритериального сравнительного анализа, а также метод главных компонентов [1, 5, 8, 9, 10]. Метод многокритериального сравнительного анализа может служить вычислительным инструментом для определения наиболее подходящих вариантов среди множества предложенных, опираясь на совокупность их характеристик или на выбранные критерии. На практике данный метод

используется во многих ситуациях, когда необходимо принять решение на основе анализа ряда параметров или функций.

К достоинствам многокритериального сравнительного анализа относятся: возможность использования различных систем критериев, как количественных, так и качественных; достаточная универсальность, обеспечивающая возможность сравнивать и ранжировать любые объекты, для которых можно построить общую систему критериев; обобщимость и оперативность, означающая, что все необходимые расчеты и экспертные оценки по методике могут выполняться одним экспертом или небольшой группой в приемлемые сроки [10].

В данном исследовании использован математический метод многокритериального сравнительного анализа, опирающийся на построение скаляра синтетического показателя, который учитывает численные значения оценок критериев и их весовые коэффициенты [10]. Этот метод характеризуется точностью и простыми вычислениями, что делает его вполне пригодным для оценки качества строительных материалов.

В качестве синтетического показателя используется скорректированный суммирующий показатель J_i , который рассчитывался по формуле [10]:

$$J_i = \sum_{j=1}^m (z_{ij} \cdot v_j),$$

где m – число критериев;

z_{ij} – кодированная мера j -го критерия для i -го варианта;

v_j – весовой коэффициент j -го критерия.

При выполнении анализа все варианты необходимо предварительно оценить в соответствии с выбранными критериями. Критерии могут быть количественные, выраженные числами, и качественные, которые требуют создания шкалы оценок и присвоения им соответствующих цифровых значений в соответствии с установленной шкалой. Для проведения анализа значениям оценок критериев, выраженным в единицах измерения, присваиваются безразмерные значения, для чего выполняется кодирование значений оценок критериев. Кодирование для стимуляторов (критериев, которые с увеличением повышают оценку качества варианта) заключается в вычислении отношения каждой числовой оценки критерия к максимальному значению в целой совокупности оценок данного критерия. В случае дестимуляторов (критериев, которые с увеличением понижают оценку качества варианта) перед кодированием вводится максимализация значений оценок. Максимализация заключается в нахождении обратного числа соответствующей оценки критерия. Далее выполняется кодирование подобно как для стимуляторов [10].

В случае применения методов, учитывающих веса критериев, следующим шагом должно быть определение значений весовых коэффициентов соответствующих критериев, при условии, что их сумма должна составлять 100%. После установления всех данных выполняется вычисление значений выбранного синтетического показателя для всех вариантов.

Итоги выполнения многокритериального сравнительного анализа вариантов составов цементных композитов могут быть представлены в виде следующих показателей: лучший вариант состава, упорядоченный список вариантов по качеству, лучший вариант на основе выделения приоритетов для группы критериев оценки.

2. Характеристика вариантов состава смесей цементных многокомпонентных композитов, выбранных для сравнительного анализа

Составы смесей композитного строительного материала с использованием отходов производства цементно-стружечных плит представлены следующими компонентами: портландцемент марки М500 ГОСТ 31108-2003, кварцевый песок мелкой фракции ГОСТ 8736-93*, отходы цементно-стружечных плит, вода ГОСТ 23732-79, добавки – пластификатор Кратосол ПК, ускоритель твердения Кратосол УТ. Отходы ЦСП имеют насыпную плотность 650 кг/м³ и следующий гранулометрический состав: свыше 1 мм – 7 %; 0,63-1 мм – 4 %; 0,32-0,63 мм – 81 %; 0,16-0,32 мм – 8 %. Водоцементное отношение для разных составов принималось исходя из условия создания равноподвижных смесей.

Компоненты смеси дозировались в соотношении согласно условиям эксперимента и отправлялись в вибровращательную мельницу периодического действия для измельчения и перемешивания. Прочность образцов определялась на 28 сутки в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Результаты экспериментального определения физико-механических показателей цементных композитов с описанными составами смесей опубликованы в [4].

Таким образом, на основе накопленных данных лабораторных испытаний для анализа были выбраны 13 составов смесей с добавлением отходов цементно-стружечных плит и модифицирующих добавок, обеспечивающих высокие значения отдельных показателей бетона (таблица 1). Приведенные в таблице 1 составы смесей цементных многокомпонентных компо-

зитов с использованием отходов ЦСП послужили основой для последующей количественной оценки их качества.

3. Критерии оценки качества цементного многокомпонентного композита

Для каждого из составов, характеризующихся одним и тем же набором критериев, были определены критерии-стимуляторы (критерии, с ростом которых качество материала растет) и критерии-дестимуляторы (критерии, с ростом которых качество материала ухудшается). Таким образом, для выполнения комплексной оценки качества бетонных материалов, с учетом положений и требований норм проектирования к их изготовлению, были выбраны 10 следующих критериев, 6 из которых характеризуют физико-механические свойства композита, 3 – экономические показатели составов смесей и 1 – экологические свойства:

K_1 – прочность на сжатие, МПа; критерий количественный, стимулятор;

K_2 – прочность на изгиб, МПа; критерий количественный, стимулятор;

K_3 – плотность, кг/м³; критерий количественный, стимулятор;

K_4 – стоимость, руб/(кг·м³) при нулевой цене отходов ЦСП; критерий количественный, дестимулятор;

K_5 – стоимость материала, руб/МПа на 1 МПа прочности при сжатии (при нулевой стоимости отходов); критерий количественный, дестимулятор;

K_6 – класс бетона; критерий количественный, стимулятор;

K_7 – морозостойкость; критерий количественный, стимулятор;

K_8 – водопоглощение, %, масс.; критерий количественный, дестимулятор;

K_9 – стоимость, руб/(кг·м³) добавок на 1 м³ бетонной смеси; критерий количественный, дестимулятор;

K_{10} – экологическая оценка материала; критерий качественный, стимулятор.

Таблица 1

Варианты составов смесей цементных многокомпонентных композитов с добавлением отходов ЦСП

№ варианта смеси	Компонентный состав				
	цемент	песок	отходы ЦСП	пластификатор Кратосол ПК (в % от массы цемента)	ускоритель твердения Кратосол УТ (в % от массы цемента)
1	0,333	0,333	0,333	0	0
2	0,25	0,75	0	0	0
3	0,143	0	0,857	0	0
4	0,2915	0,5415	0,167	0	0
5	0,2385	0,1665	0,595	0	0
6	0,1965	0,375	0,4285	0	0
7	0,242	0,361	0,397	0	0
8	0,219	0,329	0,452	0	0
9	0,237	0,422	0,304	0	0
10	0,237	0,422	0,304	0	1
11	0,237	0,422	0,304	0,8	0
12	0,237	0,422	0,304	0,4	0,5
13	0,237	0,422	0,304	0,8	0,5

4. Назначение весовых коэффициентов для оценочных критериев

Для критериев оценки были установлены весовые коэффициенты на основе экспертной оценки, полученной от группы специалистов строительной отрасли. Выполнить оценку качества многокомпонентного композита предлагается по трем системам оценивания: 1 – система с одинаковыми приоритетами и равными весовыми коэффициентами для всех 10 критериев; 2 – придание высших приоритетов физико-механическим критериям (критерии 1, 2, 3, 6, 7, 8); 3 – назначение высших приоритетов экономическим и экологическим критериям (критерии 4, 5, 9, 10) (таблица 2).

Таблица 2

Значения весовых коэффициентов критериев в зависимости от принятой системы оценивания

Критерий	Система 1 (J_1)	Система 2 (J_2)	Система 3 (J_3)
K_1	0,10	0,20	0,05
K_2	0,10	0,15	0,05
K_3	0,10	0,10	0,05
K_4	0,10	0,15	0,05
K_5	0,10	0,10	0,05
K_6	0,10	0,05	0,15
K_7	0,10	0,05	0,20
K_8	0,10	0,05	0,20
K_9	0,10	0,05	0,15
K_{10}	0,10	0,10	0,05
Σ	1,00	1,00	1,00

Установленные весовые коэффициенты использовались далее при выполнении расчетов синтетических показателей качества вариантов составов смесей по принятым критериям.

5. Порядок выполнения комплексной оценки качества

Для выполнения математического расчета комплексной оценки качества цементного материала с добавлением отходов ЦСП использовалась программа Microsoft Excel, в которой расчет был оформлен в виде таблиц, содержащих исходные данные и расчеты на отдельных этапах анализа.

На первом этапе расчета создается таблица со значениями оценок отдельных критериев для каждого варианта состава смеси (таблица 3).

Следующим шагом при проведении исследования выполняется кодирование значений оценок из таблицы 3: перевод оценок критериев, выраженных в принятых единицах измерения, в безразмерные величины. Кодирование выполняется отдельно для стимуляторов и дестимуляторов.

После вычисления кодированных значений частных оценок отдельных критериев, выполняется их корректировка с учетом весовых коэффициентов для каждой системы оценки. Заключительным этапом вычислений является суммирование частных скорректированных кодированных оценок в синтетический показатель качества J_i для каждого i -того варианта.

Таблица 3

Значения оценок вариантов смесей по принятым критериям

Номер варианта	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
1	9,81	0,325	1549,48	7,5	50	3	3030,3	388,5	0	20,5
2	22,07	0,523	2032,55	15	100	1	3575,0	161,8	0	12,1
3	7,58	0,289	1416,67	5	50	5	929,5	94,8	0	34,9
4	15,74	0,448	1690,10	10	50	2	3302,7	210,4	0	18,1
5	10,77	0,350	1585,94	7,5	50	4	1983,2	183,6	0	32,0
6	11,59	0,369	1598,96	7,5	50	4	2252,3	194,2	0	27,5
7	15,51	0,335	1585,94	10	50	4	2511,6	162,0	0	22,8
8	12,10	0,263	1588,96	7,5	50	4	2278,5	225,6	0	28,9
9	18,46	0,276	1709,64	12,5	50	3	2637,7	142,6	0	18,1
10	20,65	0,386	1795,57	15	100	3	2656,9	128,4	71,1	16,7
11	22,17	0,386	1720,05	15	100	3	2652,7	119,5	47,4	15,4
12	24,57	0,374	1766,93	15	100	3	2654,6	107,9	59,25	13,9
13	26,20	0,466	1829,57	20	100	3	2662,7	101,6	82,95	12,5

Таблица 4

Результаты многокритериального сравнительного анализа в порядке расположения вариантов от максимального значения качества к минимальному

Система 1 (J_1)		Система 2 (J_2)		Система 3 (J_3)	
J_1	Номер варианта	J_2	Номер варианта	J_3	Номер варианта
0,6893	13	0,7898	13	0,8021	3
0,6247	12	0,7003	12	0,6053	7
0,6130	2	0,6824	2	0,6014	9
0,6043	3	0,6721	11	0,5970	13
0,6002	11	0,6519	10	0,5895	5
0,5831	10	0,5750	9	0,5793	6
0,5777	9	0,5604	4	0,5567	12
0,5640	7	0,5429	1	0,5545	8
0,5631	1	0,5424	7	0,5534	2
0,5391	4	0,4915	6	0,5317	11
0,5283	6	0,4776	5	0,5242	1
0,5235	5	0,4734	3	0,5193	4
0,5005	8	0,4591	8	0,5148	10

6. Результаты исследования и их интерпретация

Вычисления синтетического показателя качества J_i для каждого варианта проводились трижды с учетом весовых коэффициентов критериев для каждой из трех систем оценивания. Результаты вычислений приведены в таблице 4.

Синтетический показатель J является основой для установления рейтинга вариантов состава смесей цементного многокомпонентного композита с добавкой ЦСП, рассмотренных в настоящем исследовании. Наибольшие и наименьшие значения этого показателя можно интерпретировать как наилучшие и наихудшие варианты составов смесей.

Различия полученных значений синтетического показателя J одного варианта состава смеси для трех систем оценивания свидетельствуют о важности правильного выбора весовых коэффициентов критериев, так как все исходные данные для расчетов, кроме весовых коэффициентов, были одинаковыми.

Наибольшие различия показателя качества выявлены между третьей системой оценивания и двумя остальными. В случае первых двух систем полученные результаты близки между собой, а в третьем на крайних позициях появились другие варианты составов материала.

В системах 1 и 2 наилучшим вариантом оказался состав 13, т.е. состав, имеющий наибольшую прочность при сжатии. Однако в 3 системе оценивания этот состав не является наилучшим, что объясняется невозможностью получить при частичной замене песка отходами ЦСП и введении добавок наиболее дешевый вариант. Тем не менее, 13 вариант состава смеси находится на 4 позиции в рейтинге 3 системы оценивания, что объективно характеризует его как один из лучших вариантов, в том числе с учетом экологических и экономических показателей.

Наилучшим вариантом в 3 системе оценивания оказался состав 3, имеющий максимальное значение критерия стоимостного показателя, в то же время в рейтинге 1 системы этот состав занимает 4 позицию. Тем не менее, считать его наиболее оптимальным нельзя так как образцы изготовленные по 3 варианту состава смеси имели минимальное значение прочности при сжатии (предпоследняя позиция в рейтинге 2 системы оценивания).

Установленный рейтинг качества вариантов состава материала по конфронтации конкурирующих вариантов дает информацию для окончательного принятия наилучшего состава.

Выводы

Использование многокритериального сравнительного анализа для оценки качества составов цементных композиционных материалов с использованием отходов ЦСП оказывается весьма эффективным, так как позволяет с минимальными трудозатратами и в крат-

чайшие сроки обработать большое количество информации и свести к единому показателю качества в виде синтетического показателя J для каждого варианта состава смеси.

Для технико-экономической оценки многокомпонентных композитов использование метода многокритериального анализа позволило при установлении определенных приоритетов выполнить ранжирование составов смесей по единственному синтетическому показателю. Выявлено, что в зависимости от принятой системы оценивания (принятие одинаковых приоритетов и равных весовых коэффициентов или придание приоритета какому-либо критерию с увеличением его весового коэффициента) в качестве наилучших вариантов выступают разные составы смесей.

Литература

1. Главные компоненты и факторный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan.html>.
2. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 368 с.
3. Проектирование и анализ эффективности составов бетона: монография / О. Л. Дворкин, Л. И. Дворкин, М. В. Горячих, В. Н. Шмигальский. – Ровно: РГТУ, 2008. – 178 с.
4. Езерский, В. А. Модификация цементных смесей с использованием отходов производства цементно-стружечных плит / В. А. Езерский, Н. В. Кузнецова, О. С. Барина // Строительные материалы. – 2016. № 6. – С. 47–49.
5. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа; под ред. И. Ф. Шахнова; пер. с англ. В. В. Подиновского и др. – Москва: Радио и связь, 1981. – 560 с.
6. О компании ЗАО «ТАМАК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tamak.ru/about/>.
7. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 10.05.2016 № 868-р // Техэксперт: инф.-справ. система / Консорциум «Кодекс».
8. Финансовая статистика: учебник / под ред. Т. В. Тимофеевой, А. А. Снатенкова. – Москва: Финансы и статистика, 2009. – 287 с.
9. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
10. Szwabowski, J. Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie / J. Szwabowski. – PS, Gliwice, 2001.

V.A. Ezerskiy
Bialystok University of Technology
N.V. Kuznetsova, A.D. Seleznev
Tambov State Technical University

THE METHODS OF COMPARATIVE EVALUATION OF THE QUALITY OF MULTICOMPONENT CEMENT COMPOSITES WITH THE USE OF INDUSTRIAL WASTE

The method of multicriteria comparative analysis is proposed to be used for comparative evaluation of the quality of multicomponent composites with the use of industrial waste. The authors consider several variants of composite mixtures compositions with the use of additives and wastes of cement bonded particle boards, for each of which a set of properties – evaluation criteria – is determined. The practical use of the multicriteria analysis method for the technical and economic evaluation of composite materials made it possible to identify the best variant of the composition by a single synthetic mark, to compile an ordered list of composition variants by quality. By setting priorities for a group of evaluation criteria that show the relevance of the specific marks of materials, it is possible to determine the best variant in accordance with the chosen priorities. The proposed method of quality evaluation can significantly save time to find the optimal variant and increase the objectivity of the evaluation.

Cement composites, industrial waste, additives, waste of cement bonded particle boards production, multicriteria comparative analysis, synthetic quality mark.