

ВЫБОР СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Т. А. Фарионова, доц., канд. техн. наук;
Ю. А. Казимиренко, доц., канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрено применение метода экспертных оценок для решения оптимизационных задач выбора состава композиционных материалов и покрытий, применяемых в экстремальных условиях.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, композиционные материалы, покрытия, оптимизационные задачи.

Анотація. Розглянуто застосування методу експертних оцінок для розв'язання оптимізаційних задач вибору складу композиційних матеріалів і покриттів, що використовуються в екстремальних умовах.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій, композиційні матеріали, покриття, оптимізаційні задачі.

Abstract. Application of the judgement method to solve the optimization selection problems of composites and coverings makeup, applied in extreme conditions, are considered.

Keywords: analytic hierarchy process, composites, coverings, optimization problems.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из способов повышения экологической безопасности транспортных и технических средств (ТТС) для перевозки и хранения опасных грузов является внедрение новых материалов и покрытий с комплексно-защитными свойствами, обеспечивающих защиту конструкций и оборудования от вредного воздействия грузов, повышение пожаробезопасности, защиту персонала, работающего на погрузочных работах и обслуживании. Необходимость учета влияния факторов экстремальных условий эксплуатации, таких как перепад температур, мощных вибраций, интенсивного износа, воздействия агрессивных сред, тепловых и

ионизирующих излучений (ИИ) в задачах выбора материалов и покрытий для защиты ТТС реализуются путем введения соответствующих критериев оценки свойств.

Качественное соизмерение критериев для оценки альтернатив, их сопоставление довольно затруднены из-за различного физического смысла, единиц измерения и пр. Поэтому выбор состава новых материалов и покрытий можно отнести к классу слабоструктурированных многокритериальных задач принятия решений [9]. Для них применяются методы экспертных оценок, основанные на теории полезности. Среди методов оценки и сравнения многокритериальных альтернатив наибольшую попу-

лярность получил подход аналитической иерархии. Метод анализа иерархий (МАИ) в настоящее время широко применяется для решения задач в области медицины, океанотехники [8]. Однако его использование в решении задач выбора состава материалов еще не было рассмотрено и является *актуальным* направлением.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является применение метода анализа иерархий для решения задачи выбора состава материалов и покрытий, предназначенных для комплексной защиты транспортных и технических средств перевозки и хранения опасных грузов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В результате проведения исследований в рамках НИР кафедры материаловедения и технологии металлов Национального университета кораблестроения разработаны металлостеклянные композиционные материалы и покрытия на стальной и алюминиевой основах, наполненные полыми стеклянными микросферами, а также порошками натрий-силикатного и свинцовосодержащего стекла. Стеклоалюминиевые композиционные материалы (КМ) получали методом горячего прессования смеси порошка алюминия марки ПА-5 (ГОСТ 6058-73) или алюминиевой пудры марки АПС-А (ГОСТ 5494-95) с полыми стеклянными микросферами марки МС-А9 (ТУ 6-48-108-94) [5]. Экспериментальные образцы композиционных покрытий толщиной 1...4 мм формировали с использованием установки КДМ-2 методом электродугового напыления на подложку из стали Ст3, предварительно подвергнутой струйно-абразивной подготовке на установке модели 026-7 «Ремдеталь». Усовершенствованная конструкция узла электродугового металлатора ЭМ-14 М [12] позволила формировать композиционные покрытия с заданным содержанием наполнителя.

Выбор технологических режимов и процесс нанесения покрытий подробно изложены в работе [7]. Для нанесения покрытий применяли стальную и алюминиевую цель-

нотянутые проволоки соответственно марок Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) и Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75). В качестве наполнителей использовали полые стеклянные микросферы (ПСМ) натрийсиликатного состава марки МС-А9 (ТУ 6-48-108-94), а также порошки стекла, полученные в результате механического измельчения отходов хрустального производства (ГОСТ 24315-80) и стеклянного боя рентгеновской аппаратуры (ГОСТ 9541-75). Основные виды покрытий, их назначение и условия эксплуатации представлены в табл. 1.

Микроструктурные исследования проводились методами электронной и оптической микроскопии соответственно при помощи электронного микроскопа-микроанализатора РЭММА-102-02 и биологического микроскопа БИОЛАМ. Качественный фазовый рентгеноструктурный анализ образцов КМ и покрытий был выполнен на установке ДРОН-3, съемка дифрактограмм проводилась с плоских шлифов в излучении меди. Результаты исследований микроструктур и фазового состава КМ и покрытий, наполненных ПСМ, приведены в работе [6].

На рис. 1 представлены микроструктуры и фрагменты дифрактограмм стальных и алюминиевых электродуговых покрытий, наполненных порошками стекла, полученными из отходов производства.

Структура КМ и покрытий представляет собой стальную или алюминиевую матрицу с равномерно расположенными стеклянными включениями, сохраняющими в процессе напыления аморфное состояние. Защитные свойства разработанных материалов и покрытий непосредственно зависят от объемного содержания стеклянного наполнителя в составе композиций. Так, при повышении концентрации стеклянных компонентов в составе КМ и покрытий увеличиваются коррозионная и химическая стойкость, понижаются коэффициенты тепло- и температуропроводности, повышаются рентгенозащитные характеристики [1].

Рассмотрим применение метода анализа иерархий для выбора объемного содержания стеклянных наполнителей в составе разработанных композиций. Данный этап работы

Таблиця 1. Назначение и условия эксплуатации металлостеклянных композиционных материалов и покрытий с комплексно-защитными свойствами

Вид ГТС, назначение КМ или покрытия	Условия эксплуатации	Требования к материалам и покрытиям	Вид КМ или покрытия
Контейнеры для хранения радиоактивных веществ низкой и средней активности (защитные вкладыши в крышку контейнера)	Суммарная активность ИИ от $2 \cdot 10^{-6}$ до 0,5 Кл/л, температура эксплуатации до 150...200 °С, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Радиационная стойкость, высокий коэффициент поглощения ИИ, высокий коэффициент теплопроводности, коррозионная и химическая стойкость, механическая прочность, низкая плотность, структурная и размерная стабильность под действием тепловых эффектов, стабильный КТЛР в диапазоне эксплуатации, негорючесть	Стеклоалюминиевый КМ (порошок Al + ПСМ)
			Стеклоалюминиевый КМ (пудра Al + ПСМ)
Контейнеры для хранения радиоактивных веществ низкой и средней активности (защитное покрытие на внутренний стальной корпус)	Суммарная активность ИИ от $2 \cdot 10^{-6}$ до 0,5 Кл/л, температура эксплуатации до 150...200 °С, воздействие коррозионных и химически активных сред, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Радиационная стойкость, высокий коэффициент поглощения ИИ, высокий коэффициент теплопроводности, коррозионная и химическая стойкость, механическая прочность, низкая плотность, структурная и размерная стабильность под действием тепловых эффектов, стабильный КТЛР в диапазоне эксплуатации, негорючесть	Алюминиевое электродуговое покрытие, наполненное ПСМ
			Алюминиевое электродуговое покрытие, наполненное натрийсиликатным стеклом
			Алюминиевое электродуговое покрытие, наполненное свинцовосодержащим стеклом
Контейнеры для хранения радиоактивных веществ низкой активности (защитное покрытие на внутренний стальной корпус)	Суммарная активность ИИ от $2 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Кл/л, температура эксплуатации до 120...150 °С, воздействие коррозионных и химически активных сред, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Радиационная стойкость, высокий коэффициент поглощения ИИ, высокий коэффициент теплопроводности, коррозионная и химическая стойкость, механическая прочность, низкая плотность, структурная и размерная стабильность под действием тепловых эффектов, стабильный КТЛР в диапазоне эксплуатации, негорючесть	Стальное электродуговое покрытие, наполненное ПСМ
			Стальное электродуговое покрытие, наполненное натрийсиликатным стеклом
			Стальное электродуговое покрытие, наполненное свинцовосодержащим стеклом
Криобиологические контейнеры (защитное покрытие для корпуса)	Температура эксплуатации до -196 °С, воздействие коррозионных и химически активных сред, инфекционная опасность, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Коррозионная и химическая стойкость, нетоксичность, негорючесть, низкая плотность, механическая прочность, стабильный КТЛР, сниженный коэффициент теплопроводности	Стальное электродуговое покрытие, наполненное ПСМ
			Стальное электродуговое покрытие, наполненное натрийсиликатным стеклом
Суда-химовозы (защитное покрытие для танков)	Температура эксплуатации до 250 °С, воздействие коррозионных и химически активных сред, взрывоопасность грузов, токсичность грузов, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Коррозионная и химическая стойкость, нетоксичность, негорючесть, водо- и влагонепроницаемость, низкая плотность, механическая прочность, стабильные коэффициенты теплопроводности и коэффициенты термического расширения при повышении температуры	Стальное электродуговое покрытие, наполненное ПСМ
Контейнеры для сыпучих химикатов (аммиак, фосфор, свинец хромово-кислый), железных окатышей, руд горных пород	Температура эксплуатации до 250 °С, воздействие коррозионных и химически активных сред, взрывоопасность грузов, токсичность грузов, механические нагрузки при монтаже и транспортировке	Коррозионная и химическая стойкость, нетоксичность, негорючесть, водо- и влагонепроницаемость, низкая плотность, механическая прочность, стабильные коэффициенты теплопроводности и коэффициенты термического расширения при повышении температуры	Стальное электродуговое покрытие, наполненное натрийсиликатным стеклом

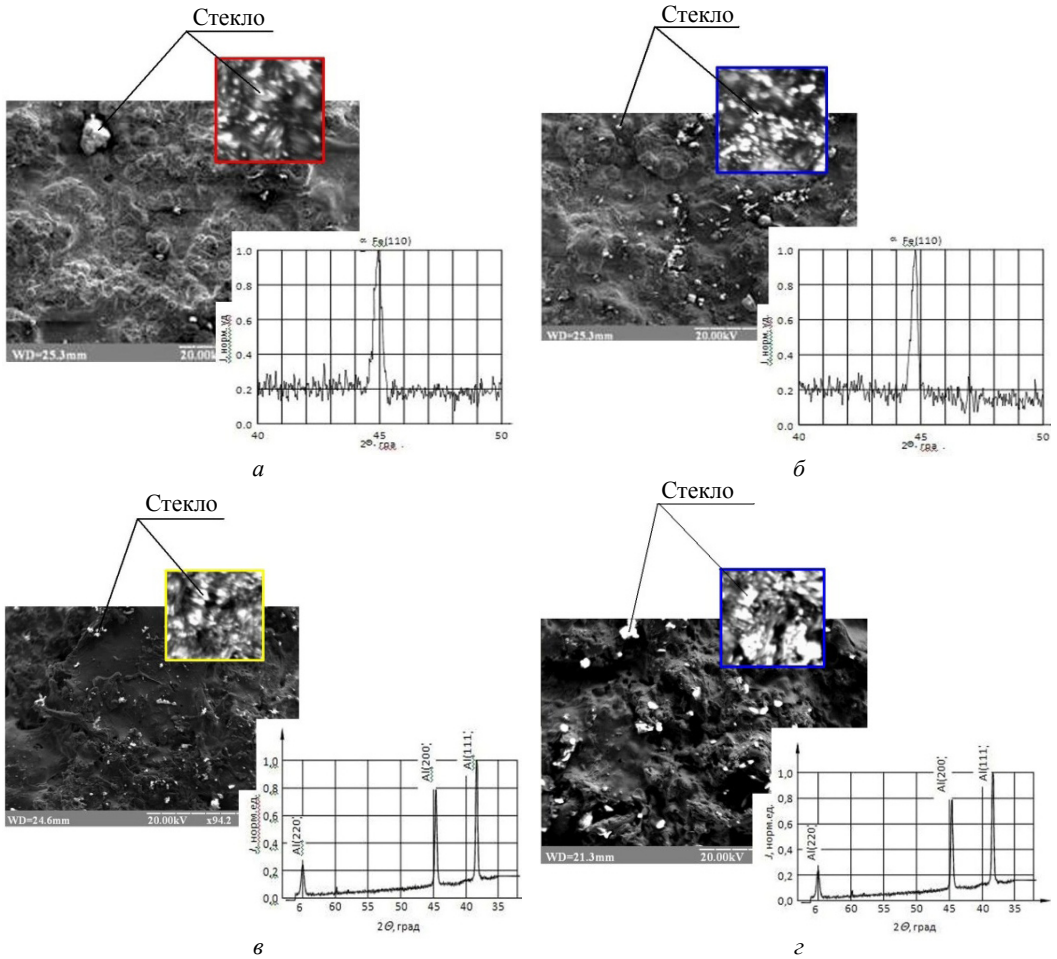


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 120$) и фрагменты дифрактограмм стальных и алюминиевых электродуговых покрытий:

a — стальное, наполненное натрийсиликатным стеклом; *б* — стальное, наполненное свинцовосодержащим стеклом; *в* — алюминиевое, наполненное натрийсиликатным стеклом; *г* — алюминиевое, наполненное свинцовосодержащим стеклом

предшествует выполнению экспериментальных работ с использованием перспективных методик планирования эксперимента и направлен на сокращение материальных затрат на дорогостоящие лабораторные исследования. В современной практике решения оптимизационных задач выбора составов композиционных материалов широко используется дифференцированный подход, при котором рецептурные задачи решаются без технологических особенностей их изготовления [10]. В основе МАИ лежат пять основных этапов, включающих в себя структуризацию задачи; расстановку приоритетов оценивания и по-

парное сравнение критериев по шкале относительной важности; формирование набора (вектора) локальных приоритетов (весов), а также проверку их согласованности. На *первом этапе* выделим главные факторы эксплуатации, которые и являются критериями оценки альтернатив (табл. 2).

В качестве альтернатив A_j выбрано объемное содержание стеклянных наполнителей в составе композиций. Данная задача рассмотрена для альтернатив A_j с объемным наполнением стеклом от 10 до 50%. Проведенные экспериментально-теоретические исследования (см. табл. 2) показали, что при

Таблиця 2. Критерии оценки комплексно-защитных материалов и покрытий

Критерии оценки	Факторы эксплуатации	Анализируемые параметры	Методики исследований
K1	Факторы, обеспечивающие температурные условия эксплуатации	Эффективный коэффициент тепло- и температуропроводности	Методика определения эффективного коэффициента температуропроводности микро неоднородных материалов [14]
K2	Факторы, определяющие эффективность защиты от ИИ	Массовый коэффициент поглощения ИИ	Методика определения полного линейного коэффициента поглощения ИИ [1]
K3	Факторы, определяющие прочностные свойства	Эффективный КТЛР	Методика определения коэффициента теплового расширения среды со сплошными включениями [2]
		Модуль сдвига	
K3	Факторы, определяющие прочностные свойства	Модуль упругости	Методика определения температурных и усадочных напряжений и деформаций в композитах, наполненных полыми стеклянными микросферами [2]
		Температурные напряжения на границе раздела фаз	
K4	Стоимостные показатели	Себестоимость КМ и покрытий	Методики технико-экономических расчетов себестоимости продукции [11]
		Материалоемкость продукции	

увеличении объемного содержания стеклянных наполнителей до 50% в составе композиций почти вдвое снижается эффективный коэффициент теплопроводности, на 35% уменьшается значение условного модуля упругости объемного сжатия металлической матрицы, при этом в 5 раз возрастает КТР композиций и на 40% снижается значение модуля сдвига. Экспериментальные исследования, проведенные на примере стеклоалюминиевых КМ и покрытий [4], показали повышение массового коэффициента по-

глощения ИИ при увеличении объемного содержания полых стеклянных микросфер с 10 до 50%. Следует отметить, что превышение установленного диапазона связано с технологическими трудностями формирования: сегрегацией порошков для КМ и точностью наполнения для покрытий. Таким образом, выбранные альтернативы будут соответствовать следующим значениям: $A_1 = 0,1$; $A_2 = 0,2$; $A_3 = 0,3$; $A_4 = 0,4$; $A_5 = 0,5$.

Общая структура решаемой задачи представлена на рис. 2.

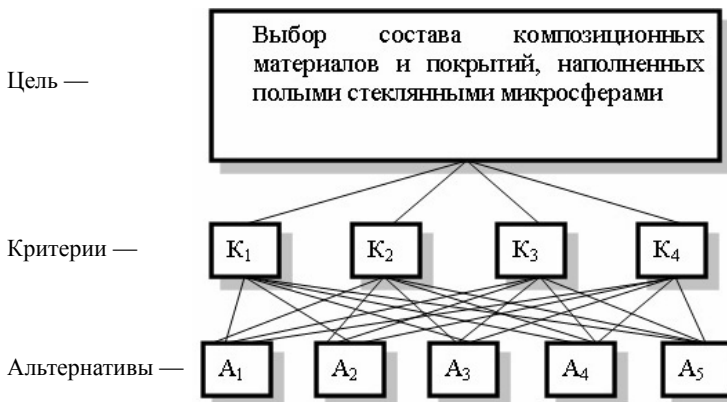


Рис. 2. Общая структура задачи

Для попарного сравнения критериев, проведенного на *втором этапе* МАИ, использовали шкалу относительной важности [13]. В статье мнение «экспертов» основывается на проведенном анализе научных работ, посвященных проблеме, а также на полученных результатах теоретических и экспериментальных исследований, выполненных непосредственно авторами. Численные значения заносятся в таблицу сравнения критериев (табл. 3).

Таблица 3. Матрица сравнения критериев

Критерий	K_1	K_2	K_3	K_4	Собственный вектор r_i	Вес критерия w_i
K_1	1	7	7	2	3,146	0,526
K_2	1/7	1	5	1/4	0,650	0,109
K_3	1/7	1/5	1	1/7	0,253	0,042
K_4	1/2	4	7	1	1,934	0,323

$\lambda_{\max} = 4,207$; ИС = 0,069; ОС = 0,077.

В этой же таблице значение собственного вектора (r_i) вычисляется по формуле

$$r_i = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n K_i},$$

где i — номер критерия; n — количество критериев; K_i — значение критерия при попарном сравнении. Нормированное значение собственного вектора (вес) критерия

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}.$$

Проверяем условие нормирования:

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 0,526 + 0,109 + 0,042 + 0,323 = 1.$$

На *третьем этапе* оптимизации проводится сравнение заданных альтернатив A_j по каждому критерию отдельно. Для этого составляются таблицы попарного сравнения альтернатив по каждому из рассматриваемых критериев с использованием шкалы относительной важности и определяется нормированное значение собственного вектора (вес) альтернативы для каждого критерия

$$v_{ij} = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j}.$$

Здесь i — номер соответствующего критерия; j — номер альтернативы; m — количество альтернатив. Значение собственного вектора альтернативы (СВА) r_j вычисляется по формуле

$$r_j = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m A_j},$$

где A_j — значение альтернативы при попарном сравнении.

Результаты оценки сведены в табл. 4.

Расчет количественных показателей, определяющих наилучшую из альтернатив, осуществляется на *четвертом этапе* МАИ. Для выбора оптимального варианта используется целевая функция

$$F = \max S,$$

где j — номер оцениваемой альтернативной конструкции; $S = \{S_j\}$, S — совокупная оценка альтернативы по всем рассматриваемым критериям, определяемая зависимостью

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij};$$

i — номер критерия оценки; v_{ij} — вес j -й альтернативы для i -го критерия.

По результатам проведенного расчета для выбранных значений альтернатив совокупная оценка каждой альтернативы, проведенная по всем критериям, составила:

$$S_1 = 0,143; S_2 = 0,149; S_3 = 0,158; S_4 = 0,223; S_5 = 0,325.$$

Следовательно, наилучшим вариантом состава композиций является A_5 , которому соответствует 50%-е объемное наполнение стеклянными компонентами ($A_5 = 0,5$). Однако окончательное решение принимается на *пятом этапе* МАИ после проверки степени отклонения от согласованности в матрице парных сравнений и наличия транзитивности (основного правила логического ввода) альтернатив в значениях S_j . Для этого подсчитывается индекс согласованности (ИС) по формуле [9, 13]

$$\text{ИС} = (\lambda_{\max} - k) / (k - 1),$$

где k — число сравниваемых элементов (в данном случае критериев или альтернатив); λ_{\max} — максимальное собственное число матрицы попарных сравнений.

Таблиця 4. Таблица сравнения альтернатив по каждому критерию

По критерию K ₁ (факторы, обеспечивающие температурные условия эксплуатации)								По критерию K ₂ (факторы, определяющие эффективность защиты от ионизирующих излучений)							
Альтернатива	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	СВА	В е с v _{ij}	Альтернатива	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	СВА	В е с v _{ij}
A ₁	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0,384	0,060	A ₁	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0,384	0,060
A ₂	2	1	1/2	1/3	1/4	0,608	0,095	A ₂	2	1	1/2	1/3	1/4	0,608	0,095
A ₃	3	2	1	1/2	1/5	0,903	0,141	A ₃	3	2	1	1/2	1/5	0,903	0,141
A ₄	4	3	2	1	1/2	1,644	0,256	A ₄	4	3	2	1	1/2	1,644	0,256
A ₅	5	4	5	2	1	2,885	0,449	A ₅	5	4	5	2	1	2,885	0,449
λ _{max} = 5,142; ИС = 0,036; ОС = 0,032								λ _{max} = 5,142; ИС = 0,036; ОС = 0,032							
По критерию K ₃ (прочностные свойства)								По критерию K ₄ (стоимостные показатели композиций)							
Альтернатива	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	СВА	В е с v _{ij}	Альтернатива	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	СВА	В е с v _{ij}
A ₁	1	1	2	2	2	1,516	0,287	A ₁	1	1	2	2	2	1,516	0,287
A ₂	1	1	1	2	2	1,320	0,250	A ₂	1	1	1	2	2	1,320	0,250
A ₃	1/2	1	1	1	2	1,000	0,189	A ₃	1/2	1	1	1	2	1,000	0,189
A ₄	1/2	1/2	1	1	2	0,871	0,165	A ₄	1/2	1/2	1	1	2	0,871	0,165
A ₅	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0,574	0,109	A ₅	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0,574	0,109
λ _{max} = 5,097; ИС = 0,024; ОС = 0,022								λ _{max} = 5,097; ИС = 0,024; ОС = 0,022							

Методика проверки степени отклонения от согласованности (ОС) в матрице парных сравнений детально изложена в [8, 9]. Итоговые результаты (λ_{max}, ИС, ОС) приведены непосредственно в таблицах попарных сравнений критериев и альтернатив (см. табл. 3 и 4).

Обобщим измерение согласованности на всю иерархию. Для этого необходимо индекс согласованности, полученный из матрицы попарных сравнений, умножить на приоритет свойства, относительно которого выполнялось сравнение, и к этому числу добавить аналогичные результаты для всей иерархии (M):

$$M = 0,069 + (0,526; 0,109; 0,042; 0,323) \begin{pmatrix} 0,036 \\ 0,036 \\ 0,024 \\ 0,024 \end{pmatrix} = 0,10.$$

Затем данная величина сравнивается с соответствующим индексом, который получен как сумма случайно сформированных индексов, взвешенных посредством приоритетов (M̄):

$$\bar{M} = 0,9 + (0,526; 0,109; 0,042; 0,323) \begin{pmatrix} 1,12 \\ 1,12 \\ 1,12 \\ 1,12 \end{pmatrix} = 2,02.$$

Отношение M/M̄ должно находиться в окрестности 0,1, чтобы не появилось сомнений в усовершенствовании фактического функционирования и в суждениях [13]:

$$M/\bar{M} = 0,05.$$

Результат говорит о хорошей согласованности иерархии в целом.

Проведенные расчеты показали выполнение проверок на отношение согласованности и на транзитивность, на основании чего и можно сделать вывод, что наилучшей альтернативой состава композиций, обеспечивающей заданные условия эксплуатации, является 50%-е объемное наполнение стеклянными компонентами (A₅ = 0,5).

Однако проведенная аналитическая оценка не учитывает такие структурные особенности полученных композиций, как пористость, форма частиц, и предусматривает необходимость соблюдения высокой точности дозировки наполнителя, что не всегда удается точно соблюдать в случае электродугового напыления. Поэтому наиболее реальную оценку эксплуатационных свойств могут дать только результаты экспериментальных исследований.

Так, дальнейшим этапом работы стало изготовление экспериментальных образцов электродуговых покрытий и композиционных материалов с объемным содержанием стеклянных компонентов 50%, которые подвергли испытаниям. Результаты экспериментальных исследований физико-механических и защитных свойств стеклоалюминиевых КМ изложены в работе [6], поэтому в данной статье приведем результаты исследований свойств электродуговых покрытий, наполненных полими стеклянными микросферами, порошками натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекла. Кажущаяся плотность покрытий была определена в результате гидростатического взвешивания. Общая пористость рассчитывалась с исполь-

зованием значений кажущейся плотности, оценка открытой пористости проводилась согласно экспериментальным методикам по объему, заполненному дистиллированной водой [3]. Твердость напыленных покрытий измерялась по методу Виккерса на приборе ТПП-10 при нагрузке 5 кг, погрешность измерения не превышала $\pm 10\%$. Определение микротвердости составляющих фаз осуществлялось с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Прочность сцепления покрытий толщиной 2 мм со стальной основой была определена по ГОСТ 9.304-87 методом испытания на отрыв.

Полученные характеристики напыленных композиций сравнили со свойствами ненаполненных электродуговых покрытий, полученных при тех же технологических параметрах. Рентгенозащитные характеристики, в том числе и массовый коэффициент поглощения ИИ, экспериментально исследовались по методике, изложенной в работе [4], при помощи рентгеновской установки ДРОН-3, где в качестве источника излучения использовали трубку БСВ-24 с медным анодом $Cu_{ka}=1,54178$. Результаты проведенных экспериментальных исследований сведены в табл. 5.

Таблица 5. Физико-механические и защитные свойства композиционных покрытий

Свойства	Ненаполненное электродуговое покрытие	Наполненное натрийсиликатным стеклом	Наполненное свинцовосодержащим стеклом	Наполненное ПСМ
Стальные покрытия				
Кажущаяся плотность, кг/м ³	7053	7026	6064	5800
Пористость, %:				
общая	17	19	20	22
открытая	3	2	5	4
Твердость HV _s , МПа	1622	2668	1800,2	2015
Микротвердость, МПа:				
матрицы	1280	1302	1310	1326
наполнителя	–	14	13,7	12,5
Прочность сцепления $\sigma_{отр}$, МПа	25,7	27	15,1	20,2
Массовый коэффициент поглощения ИИ	2,46	2,99	3,03	4,93
Алюминиевые покрытия				
Кажущаяся плотность, кг/м ³	1700	1770	1860	1480
Пористость, %:				
общая	12	15	17	22
открытая	2	2	3	5
Твердость HV _s , МПа	428	773	703	777

Свойства	Ненаполненное электродуговое покрытие	Наполненное натрийсиликатным стеклом	Наполненное свинцовосодержащим стеклом	Наполненное ПСМ
Алюминиевые покрытия				
Микротвердость, МПа: матрицы	347	356	363	372
наполнителя	–	14,2	13,4	12,7
Прочность сцепления $\sigma_{отр}$, МПа	19,1	20,3	15,0	15,8
Массовый коэффициент поглощения ИИ	7,9	14,19	14,5	18,6

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в результате введения в состав электродуговых покрытий стеклянных компонентов твердость по Виккерсу возрастает на 24...64 % для стальных и на 64...81 % для алюминиевых. При этом максимальной твердостью обладает композиция, наполненная натрийсиликатным стеклом, этот же вид покрытия характеризуется самой высокой прочностью сцепления с подложкой. Из приведенных в табл. 5 данных видно, что наибольшей способностью поглощать ионизирующие излучения характеризуются алюминиевые электродуговые покрытия, наполненные полыми стеклянными микросферами, их массовый коэффициент поглощения ИИ сопоставим с аналогичными значениями для стеклоалюминиевых КМ, полученных методом спекания [4]. Следует также отметить, что введение в состав электродуговых покрытий до 50% (объемных) стеклянных дисперсных наполнителей повышает рентгенозащитные характеристики стальных и алюминиевых покрытий в 2,0...2,5 раза. Полученные результаты следует использовать для определения граничных условий эксплуатации и разработки практических рекомендаций по изготовлению и дальнейшему применению

конструкций ТТС, предназначенных для перевозки и хранения опасных грузов, таких как химически активные вещества, биологические продукты, радиоактивные отходы низкой и средней активности.

ВЫВОДЫ

1. Впервые метод анализа иерархий применен для выбора объемного содержания стеклянного дисперсного наполнителя в составе металлостеклянных композиционных материалов и покрытий, что позволяет сократить количество дорогостоящих исследований и является необходимым этапом, предшествующим выполнению экспериментальных работ.

2. Наилучшей альтернативой состава композиций, обеспечивающей заданные условия эксплуатации, является 50%-е объемное наполнение стеклянными компонентами, т. е. $A_5 = 0,5$. 3. Установлено, что по сравнению с ненаполненными стальными и алюминиевыми электродуговыми покрытиями наполненные стеклом композиции обладают повышенными в 2,0...2,5 раза значениями массового коэффициента поглощения ионизирующих излучений, при этом твердость по Виккерсу стальных покрытий превышает на 24...64%, а алюминиевых — на 64...81%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Бреховских, С. М.* Радиационные эффекты в стеклах [Текст] / С. М. Бреховских, Ю. Н. Викторова, Л. М. Ланда. — М. : Энергоиздат, 1982. — 184 с.
- [2] *Ванин, Г. А.* Микромеханика композиционных материалов [Текст] / Г. А. Ванин. — К. : Наукова думка, 1985. — 304 с.
- [3] Измерения в промышленности [Текст] : справочник : в 3 т. / под ред. П. Профоса : пер. с нем. — М. : Металлургия, 1990. — Т. 3 : Способы измерения и аппаратура. — 344 с.

- [4] *Казимиренко, Ю. А.* Исследование ослабления ионизирующего излучения композиционными материалами [Текст] / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко, С. И. Шкурат, А. А. Жданов // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 2 (425). — С. 105–109.
- [5] *Казимиренко, Ю. А.* Новые металлостеклянные композиционные материалы на основе полых стеклянных микросфер [Текст] / Ю. А. Казимиренко // Зб. наук праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2005. — № 2 (401). — С. 40–44.
- [6] *Казимиренко, Ю. А.* Структурные особенности формирования металлостеклянных композиционных материалов на основе полых стеклянных микросфер [Текст] / Ю. А. Казимиренко, Г. В. Волков // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2006. — № 6 (411). — С. 81–86.
- [7] *Казимиренко, Ю. А.* Формирование электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами [Текст] / Ю. А. Казимиренко, А. А. Карпеченко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 1 (424). — С. 81–86.
- [8] *Коваленко, И. И.* Экспертные оценки в управлении инновационными проектами [Текст] : учеб. пособие / И. И. Коваленко, С. В. Драган, М. А. Рыхальский. — Миколаїв : НУК, 2007. — 168 с.
- [9] *Коваленко, И. И.* Методы принятия решений [Текст] / И. И. Коваленко, Т. А. Фарionoна, С. Б. Приходько. — Миколаїв : НУК, 2009. — 180 с.
- [10] *Кондращенко, В. И.* Новый подход к постановке оптимизационных задач бетоноведения [Текст] / В. И. Кондращенко // Транспортное строительство. — 2007. — № 9. — С. 10–18.
- [11] *Кочетов, В.В.* Инженерная экономика [Текст] / В. В. Кочетов, А. А. Колобов, И. Н. Омельченко. — М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 669 с.
- [12] Пат. 83603 Україна, МПК51 С 23 С 4/00, С 23 С 4/04; С 23 С 4/06; С 23 С 4/10; С 23 С 4/12; В 05 В 7/16; В 05 В 7/24. Пристрій для електродугового напилення [Текст] / Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Шумов С.М.; заявник і власник патента Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — № а2007 07157; заявл. 25.06.2007; опубл. 25.07. 2008, Бюл. № 14. — 4 с.
- [13] *Саати, Т.* Аналитическое планирование. Организация систем : [Текст] / Т. Саати, К. Кернс : пер. с англ. — М. : Радио и связь. 1991. — 224 с.
- [14] Эффективный коэффициент температуропроводности микронеоднородных материалов [Текст] / В. А. Новиков, Я. Н. Корниенко, А. Н. Пивень, О. В. Жарова, Л. Н. Удовенко // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2004. — № 6. — С. 66–70.