

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16

Беляев А.О., *Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзеништадт А.М., Третьяков М.Р.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

*E-mail: v.danilov@narfu.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ТАГУЧИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА

Аннотация. Важной составляющей оптимизации плана проведения экспериментов при многовариантном изменении входящих параметров является подход, связанный с математическим планированием эксперимента. Этот прием известен и широко используются исследователями. Вместе с тем существуют подходы, позволяющие решить поставленные задачи с применением методов, которые до настоящего времени мало использованы в строительном материаловедении. Одним из таких приемов является математический метод, предложенный Генити Тагучи. В статье рассмотрены принципы использования ортогональной матрицы Тагучи при оптимизации состава строительного материала на примере органоминерального композита на основе механоактивированного сапонитсодержащего сырья, извести, древесной муки и волокон химико-термомеханической массы. Изучено влияние содержания каждого компонента на физико-механические свойства композита. Проанализированы результаты 16 серий экспериментов и трех уточняющих, в результате чего был установлен рациональный состав композита с прочностными характеристиками на 15 % выше чем у контрольного состава при меньшей (на 35 %) плотности. Данный состав имеет относительно низкий коэффициент теплопроводности $0,11 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и группу горючести Г1 (слабогорючий), что позволяет использовать листы на его основе, взамен гипсоволоконным листам (ГВЛ), для обшивки конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности.

Ключевые слова: сапонитсодержащий материал, органоминеральный композит, прочностные и теплофизические характеристики.

Введение. Одним из возможных путей утилизации не востребуемых промышленностью ЛПК и ЦБК древесных и целлюлозных отходов является их использование в составах строительных композитов различного технического назначения [1–5]. Так древесная мука широко используется в качестве наполнителя для древесно-полимерных композитов [6], а целлюлозные волокна в качестве армирующей добавки в сухих строительных смесях [7].

Тем не менее, до сих пор не разработаны составы и технология получения композитов на основе «сырой» необожжённой глины (по аналогии с саманом – кирпичем-сырцом на основе глинистого грунта с добавлением соломы) с использованием древесных и целлюлозных отходов и полуфабрикатов. По нашему мнению, использование сырой глины в качестве вяжущего для получения органоминеральных композиционных плит (ОМКП) на основе вышеуказанного растительного сырья имеет ряд экологических и экономических преимуществ по сравнению с цементом – она является широко распространенным и доступным в больших количествах природным материалом и не требует обжига для проявления «вяжущих свойств». Так «схватывание» необожжённой глины – обратимый про-

цесс, поскольку происходит только за счет высыхания, тогда как схватывание цемента – необратимо. Получаемые изделия на ее основе возможно многократно ремонтировать и перерабатывать, что является их преимуществом, однако при контакте с большим количеством воды или сильном увлажнении глина начинает набухать, течь и расплываться, что может привести к разрушению конструкций [8]. Однако, данный недостаток вяжущих на основе сырой глины возможно преодолеть путем ее активации и последующего смешивания с известковым раствором. Из многолетней практики укрепления грунтов [9], а также многочисленных лабораторных экспериментов и модельных исследований структурных изменений в глинах при их взаимодействии со щелочными растворами [10] известно, что добавление извести в глинистую систему приводит к пуццолановым реакциям.

В Архангельской области имеется техногенное месторождение сапонитовых глин, в виде хвостохранилищ горно-обогадательного алмазодобывающего предприятия АО «Севералмаз» (месторождение алмазов имени М.В. Ломоносова), на которых ежегодно складировются несколько миллионов тонн перспективного для строительной отрасли глинистого сырья, кото-

рое можно использовать для получения органоминеральных композиционных плит [11]. По нашему мнению, данные плиты или листы можно будет использовать для обшивки конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности, поскольку сапонит является негорючим материалом, способным удерживать в своей структуре большое количество связанной воды и отдавать ее при нагреве и огневом воздействии, а за счет своих сорбционных и гидрофизических свойств материалы на его основе способны саморегулировать свою влажность и температуру в зависимости от окружающих условий и адаптироваться к резким ее изменениям, что представляет особый интерес с точки зрения «техногенного метасоматоза» [12].

Таким образом, целью исследования стала разработка состава и технологии получения органоминерального композита в виде плит и листов с повышенными прочностными и пожарно-техническими характеристиками, что потребовало проведения нескольких этапов оптимизации: дисперсности исходного сырья, состава композита и технологии его производства. В данной работе приводится этап оптимизации состава органоминерального композита с использованием ортогональных матриц по методу Генити Тагучи [13].

Материалы и методы. В качестве компонентов безцементного композиционного вяжущего использовали механоактивированный сапонитсодержащий порошок (МСП), полученный на технологической линии опытно-промышленного узла №2 обогатительной фабрики АО «Севералмаз», а также гашеную известь по ГОСТ 9179-2018. Удельная площадь поверхности сырья, определенная методом газопроницаемости по Козени-Кармана на приборе ПСХ-10а, составляет 390 м²/кг для МСП и 2500 м²/кг для извести. В качестве наполнителя и армирующего компонента использовали древесную муку (ДМ) марки 560 по ГОСТ 16361-87 и волокна химико-термомеханической массы (ХТММ) марки S400/50 (еловая) производства Светогорского ЦБК (древесный волокнистый полуфабрикат, получаемый обработкой щепы химическими реагентами, теплом и последующим механическим размолотом). Древесная мука была получена механоактивацией еловых опилок в планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 в стальной гарнитуре объемом 500 мл (25 размольных тел в виде шаров диаметром 1 см) в продолжении 10 минут при 420 об/мин. Образцы композита получали путем смешивания в сухом виде навесок вышеуказанного сырья в заданных пропорциях, с последую-

щим порционным добавлением воды и доведением до однородного пастообразного состояния. Полученную пластичную смесь укладывали в металлические формы, через сутки образцы распалубливали. Твердение и сушка образцов происходила на воздухе в комнатных условиях (20÷25 °С) в течение 7 суток. Среднюю плотность полученных образцов и изменение их объема после набора прочности определяли по известным стандартным методикам. Предел прочности на сжатие определяли на испытательной машине Shimadzu AGS-5kNX при скорости нагружения 50 Н/с. Коэффициент конструктивного качества (ККК, МПа) рассчитывали по формуле:

$$\text{ККК} = \frac{R_{\text{сж}}}{\rho_0}, \quad (1)$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии, МПа; ρ_0 – относительная средняя плотность.

$$\rho_0 = \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{в}}}$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность, кг/м³; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³ (1000 кг/м³).

Коэффициент теплопроводности для рационального состава композита определяли методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076-99 с помощью прибора ИТС-1 «150», а группу горючести – по методу I ГОСТ 30244-94 в лаборатории «Пожарно-технической экспертизы строительных и отделочных материалов» на установке для испытаний строительных материалов на негорючесть.

Микрофотографии скола образцов после физико-механических испытаний получены на электронном микроскопе Tescan Vega 3.

Основная часть. Известно, что экспериментальный подход подбора состава композита перебором (методом проб и ошибок) до достижения оптимальных свойств материала приводит к значительным временным и материальным затратам. Поэтому в нашем случае целесообразно использовать метод планирования эксперимента Генити Тагучи, позволяющий минимизировать число опытов и определить тенденцию изменения свойств материала при варьировании содержания компонентов. Особенностью планирования эксперимента по Г. Тагучи является использование ортогональных матриц, в которых взаимодействуют разделенные на уровни управляемые параметры. Выбор ортогональной матрицы зависит от количества используемых параметров и числа уровней, на которые они разделяются при планировании экспериментов. Принятые в данной работе значения управляемых параметров сведены в таблицу 1, ортогональная матрица Тагучи для оптимизации состава органоминерального композита представлена в таблице 2.

Таблица 1

Значения управляемых параметров

Управляемый параметр	Уровень параметра				Примечание
	1	2	3	4	
А. Содержание извести, % по массе	0	15	30	45	Стабилизатор усадки
В. Содержание ДМ, % по массе	0	10	20	30	Легкий наполнитель
С. Содержание ХТММ, % по массе	0	2	4	6	Армирующая добавка
Д. Водотвердое отношение	0,4	0,45	0,50	0,55	

Так, в качестве управляемых параметров были выбраны: содержание в смеси (в % по массе взамен МСП) извести, древесной муки и волокон химико-термомеханической массы и водотвердое отношение. Поскольку указанные значения (в таблице 1) содержания модифицирующих компонентов показывают процент замены основного компонента – механоактивированного сапонитсодержащего порошка, то его количество можно рассчитать, как 100% за вычетом суммарного содержания добавок. Уровень параметра 1 для извести, ДМ и ХТММ был принят равным нулю с целью получения контрольной бездобавочной серии по сравнению с которой можно будет оценить эффект от введения того или иного компонента. Уровни параметра 2-4 для извести были приняты исходя из предварительных экспериментов по получению 2-х компонентной системы «МСП-известь», которые показали, что данные количества позволяют практически полностью устранить усадку мате-

риала при сушке и твердении. Содержание древесной муки выбрано исходя из оптимального содержания 20 % по массе определенного ранее в 2-х компонентной системе «МСП-ДМ» и позволяющее значительно облегчить материал без потери его прочностных характеристик. Содержание армирующей добавки – волокон ХТММ ограничено диапазоном от 2 до 6 %, исходя из имеющегося опыта получения композитов, армированных целлюлозными волокнами. Очевидно, что добавление в состав извести, древесной муки и особенно волокон химико-термомеханической массы (со значением водопоглощения по массе порядка 500 %), потребует увеличения водо-твердого отношения для получения пластичной смеси, которую возможно будет уложить в формы для набора прочности. Данный факт отразился на уровнях параметра В/Т. Таким образом, исходя из количества управляемых параметров и их уровней была выбрана ортогональная матрица Тагучи $L_{16}(4^4)$ приведенная в таблице 2.

Таблица 2

Ортогональная матрица Тагучи

№ серии	Уровень параметра			
	А	В	С	Д
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Выбранный экспериментальный план подразумевает проведение 16 опытов (в нашем случае 16 серий составов композита) для исследования влияния 4-х факторов на 4-х уровнях, что позволяет существенно сократить материальные и временные затраты, т.к. простым перебором потребовалось бы проведение 256 опытов (4^4).

Данный подход обеспечивает высокую ортогональность, позволяя независимо оценить влияние каждого фактора (управляемого параметра) на выходные параметры (свойства композита) при минимизации общего количества экспериментов.

Так, в качестве таких выходных параметров были выбраны средние значения: объемной усадки при высыхании и твердении на 7 сутки ($\Delta V_{7\text{сут.ср.}}$, %), средней плотности ($\rho_{\text{ср.}}$, кг/м³), предела прочности при сжатии на 7 сутки ($R_{\text{сж}7\text{сут.ср.}}$, МПа), предела прочности при изгибе на 7 сутки

($R_{\text{изг}7\text{сут.ср.}}$, МПа), коэффициента конструктивного качества ($K_{\text{ККср.}}$, МПа), предела прочности при сжатии на 28 сутки ($R_{\text{сж}28\text{сут.ср.}}$, МПа). Результаты серий экспериментов сведены в таблицу 3, а их интерпретация дана в таблице 4.

Таблица 3

Результаты серий экспериментов

№ серии	Выходные параметры (характеристики ОМКП)					
	$\Delta V_{7\text{сут.ср.}}$, %	$\rho_{\text{ср.}}$, кг/м ³	$R_{\text{сж}7\text{сут.ср.}}$, МПа	$R_{\text{изг}7\text{сут.ср.}}$, МПа	$K_{\text{ККср.}}$, МПа	$R_{\text{сж}28\text{сут.ср.}}$, МПа
1	39	2025	9,24	5,24	4,56	9,38
2	31	1632	9,78	6,15	5,99	10,56
3	25	1296	5,99	4,73	4,63	8,90
4	17	1013	2,73	3,78	2,69	5,34
5	21	1461	4,68	1,84	3,21	7,39
6	16	1274	2,40	1,10	1,88	2,49
7	9	814	0,61	0,52	0,74	0,71
8	5	693	0,35	0,09	0,51	0,55
9	10	1219	3,32	1,67	2,72	3,40
10	3	899	0,91	0,56	1,01	1,11
11	-8	762	0,22	0,22	0,29	0,19
12	6	643	0,10	0,01	0,16	0,11
13	-5	1031	1,64	1,12	1,59	2,29
14	-8	775	0,26	0,23	0,34	0,15
15	-7	811	0,46	0,54	0,57	0,60
16	-9	598	0,09	0,05	0,15	0,07

Интерпретация результатов заключается в расчете (для каждого уровня управляемого параметра) суммы значений выходных параметров (характеристик композита) из 4-х серий экспериментов (где был реализован данный уровень управляемого параметра) с последующим поиском наилучших их значений и соответствующим им наилучшим уровнем. Например, уровень управляемого параметра А (Содержание извести, % по массе) был одинаковым и равным 1 (см. таблицу 2), а соответствующее ему значение этого параметра было равно 0% (см. таблицу 1) в сериях экспериментов 1-4, поэтому для расчета суммы значений выходных параметров для 1 уровня управляемого параметра А (таблица 4) суммировали значения из соответствующих строк для серий №1-4 (таблицы 3). Так сумма значений усадки в данном случае рассчитывалась как 39+31+25+17=112. Аналогичным образом рассчитывались остальные значения. В качестве примечания можно отметить, что иногда при планировании эксперимента по Г. Тагучи вместо безразмерной суммы значений выходных параметров рассчитывается их среднее значение, что, однако, никак не влияет на дальнейшую интерпретацию результатов.

Интерпретация полученных результатов приведена в таблице 4 в последнем столбце в виде промежуточных выводов. Из них следует, что оптимальное содержание ДМ составляет 10%, ХТММ 2%, В/Т 0,45, а содержание извести

требуется уточнить для чего было изготовлены и испытаны 3 новые серии образцов (таблица 5).

Основополагающим параметрами оптимизации на этом этапе были прочностные характеристики, поэтому состав серии №18 был выбран в качестве рационального. По сравнению с контрольным (серия №1 – образцы из МСП) у данного состава отмечается уменьшение относительной объемной усадки в 2 раза при снижении плотности на 35 % и повышении прочности на сжатие и изгиб на 15%, коэффициент конструктивного качества выше в 1,5 раза. При этом коэффициент теплопроводности композита 0,11 Вт/(м·К) при значениях прочности на сжатие 10,6 МПа и изгибе 6,05 МПа, по нашему мнению, позволяют отнести полученный материал к конструкционно-теплоизоляционным. В ходе испытания на негорючесть образец потерял 18% по массе (< 50 %), температура в ходе испытания поднялась с 750 °С до 770 °С ($\Delta t < 50$ °С), однако было зафиксировано открытое пламя в течение более 10 секунд. Таким образом, в ходе пожарно-технических испытаний было установлено, что предлагаемый композит является горючим (последующие уточняющие огневые испытания показали, что материал относится к группе Г1 - слабогорючие), что свидетельствует о возможности его использования при обшивке конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности

Таблица 4

Интерпретация результатов

Управляемый параметр	Уровень (значение)	Сумма значений выходных параметров (характеристик ОМКП)						Интерпретация результата
		ΔV	ρ	$R_{сж7}$	$R_{изг7}$	ККК	$R_{сж28}$	
А. Содержание извести, % по массе	1 (0%)	112	5966	27,7	19,9	17,9	34,2	Замена части МСП (сверх 15% по массе) на известь оказывает наибольшее положительное влияние на уменьшение усадки и средней плотности, однако приводит к существенному снижению прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита известь следует вводить в количестве менее 15% по массе. Требуется уточнение содержания.
	2 (15%)	50	4243	8,0	3,6	6,3	11,1	
	3 (30%)	12	3523	4,5	2,5	4,2	4,8	
	4 (45%)	-29	3215	2,4	1,9	2,6	3,1	
В. Содержание ДМ, % по массе	1 (0%)	65	5737	18,9	9,9	12,1	22,5	Замена части МСП (до 10% по массе) на ДМ оказывает положительное влияние на уменьшение средней плотности, однако приводит к снижению прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита древесную муку следует вводить в количестве до 10% по массе, а снижение прочности компенсировать армирующей добавкой.
	2 (10%)	42	4580	13,3	8,1	9,2	14,3	
	3 (20%)	19	3683	7,3	6,0	6,2	10,4	
	4 (30%)	19	2948	3,3	3,9	3,5	6,1	
С. Содержание ХТММ, % по массе	1 (0%)	38	4659	12,0	6,6	6,9	12,1	Замена части МСП (до 2% по массе) на ХТММ практически не оказывает влияния на усадку и среднюю плотность композита, однако приводит к повышению его прочностных характеристик. Следовательно, в состав композита ХТММ следует вводить в количестве до 2% по массе
	2 (2%)	51	4547	15,0	8,5	9,9	18,7	
	3 (4%)	32	3983	9,9	6,7	8,2	13,0	
	4 (6%)	24	3758	5,9	6,0	6,0	9,5	
D. Водогвердое отношение	1 (0,40)	46	4257	10,2	6,0	5,8	10,4	Повышение В/Т с 0,4 до 0,45 практически не оказывает влияния на усадку и среднюю плотности композита, однако приводит к повышению его прочностных характеристик. Следовательно, В/Т при изготовлении композита следует принимать 0,45*.
	2 (0,45)	23	4119	12,0	7,6	8,4	13,6	
	3 (0,50)	41	4254	11,7	7,2	9,0	17,5	
	4 (0,55)	36	4317	8,9	7,1	7,9	11,8	

*При В/Т 0,5 предел прочности при сжатии композита на 28 суток выше чем при 0,45, однако состав и процесс изготовления ОМКП ближе к саману - кирпичу-сырцу, который твердеет на воздухе 7 дней.

Таблица 5

Уточнение содержание извести в составе ОМКП

№ серии	Состав	Характеристики ОМКП						Группа горючести
		ΔV , %	$\rho_{ср}$, кг/м ³	$R_{сж7сут.ср}$, МПа	$R_{изг7сут.}$, МПа	ККК, МПа	λ , Вт/(м·К)	
17	МСП 88%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	35	1688	10,34	5,06	6,13	—	—
18	МСП 83%, Известь 5%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	21	1501	10,60	6,05	7,06	0,11±0,01	Г1 (слабогорючие), потеря по массе 18 %
19	МСП 78%, Известь 10%, ДМ 10%, ХТММ 2% В/Т 0,45	13	1229	3,66	2,91	2,97	—	—

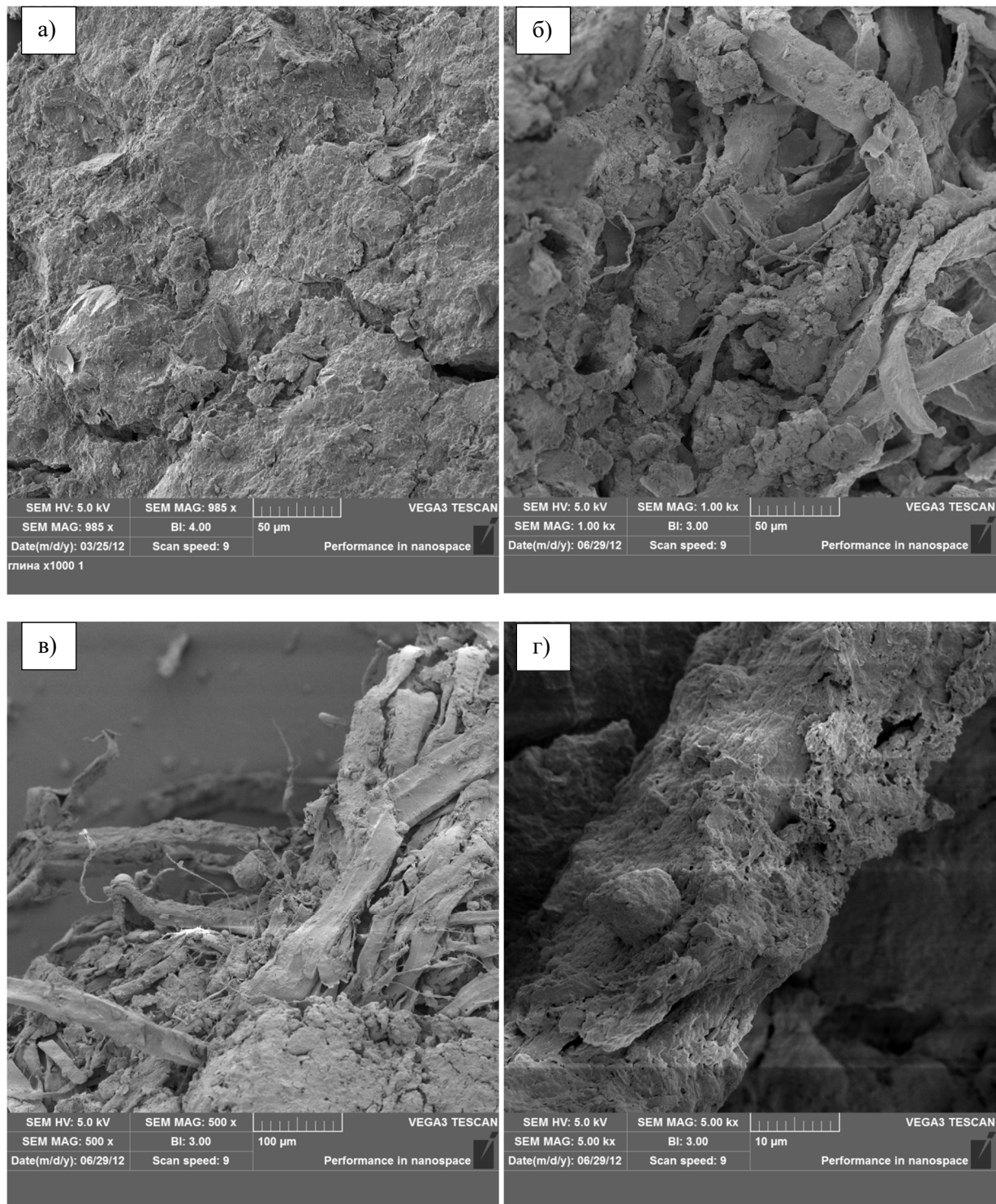


Рис. 1. Электронные фотографии поверхности скола контрольного и экспериментальных образцов ОМКП
 а) Контрольный образец из МСП; б) Образец 18 серии; в) Выход волокон ХТММ; г) Поровая структура

Электронные фотографии скола контрольного и экспериментальных образцов ОМКП (после испытания по определению предела прочности при сжатии) приведены на рисунке 1. Обсуждая полученные снимки можно предположить, что в ходе испытания у контрольного образца из МСП (рисунок 1а), у которого нет в составе армирующего и демпфирующего компонентов, наблюдается значительная пластическая деформация вплоть до момента полного разрушения, обусловленная проскальзыванием слоев

глинистых минералов друг относительно друга. Морфология поверхности скола слаборазвита (относительно гладкая), структура порового пространства образована трещинами и клиновидными порами, сформированными в ходе частичного отслоения чешуек, пластинок и пленок сапонита. Напротив, в образцах серии 18 (рациональный состав) волокна ХТММ и частицы древесной муки прошивают глинистую матрицу и, по сути, являются концентраторами напряже-

ний при деформации и смещении слоев глинистых минералов (рисунок 1б, в). В момент времени, когда армирующие волокна и древесные частицы больше не могут выдерживать напряжение от сдвига слоев, происходит хрупкое разрушение. Морфология поверхности разлома более развитая, на частицах древесной муки и волокна ХТММ видны наслоения налипшей глины, как в виде отдельных слоев, так и локально расположенных закрепившихся агрегатов. Структура порового пространства (рисунок 1г) помимо трещин и клиновидных пор образована цилиндрическими каналами и порами, сформированными в ходе вытягивания и вырывания волокон и частиц древесной муки при расколе и последующем смещении частей образца. Таким образом наличие армирующего и демпфирующего компонентов в составе композита придает дополнительную жесткость и прочность его структуре.

Выводы.

1. Показано, что использование ортогональной матрицы Тагучи является эффективным методом планирования эксперимента при оптимизации состава строительного материала. Так, проанализировав результаты всего 19 серий экспериментов (16 основных и 3 уточняющих) вместо 256 перебором удалось установить рациональный состав органоминерального композита на основе МСП, извести, ДМ и ХТММ с прочностными характеристиками на 15% выше при меньшей плотности на 35%, чем у образцов контрольного состава. Проведенные теплотехнические и пожарно-технические испытания образцов данного состава продемонстрировали, что предлагаемый композит является слабогорючим и имеет относительно низкий коэффициент теплопроводности (0,11 Вт/(м·К)), что свидетельствует о возможности его использования при обшивке конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности.

2. Установлено, что ввод древесной муки и армирующих волокон ХТММ в состав композита способствует повышению его жесткости, сокращению усадочных деформаций, предотвращает образование и раскрытие трещин, повышает прочность на сжатие и изгиб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Самченко С.В., Бруяко М.Г. Использование отходов целлюлозно-бумажной промышленности в технологии вяжущих и цементных систем // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 4. С. 301–309. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-301-309. EDN: GCICKX.

2. Богданов А., Шатрова А., Качор О. Использование накопленных отходов целлюлозно-

бумажной промышленности в качестве компонентного сырья для получения цементов // Экология и промышленность России. 2017. №. 21(11). Рр. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-15-19

3. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А. Увеличение роста эффективности производства изделий с использованием древесных композитов // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–7. С. 1550–1554.

4. Данилов В.Е., Шинкарук А.А., Айзенштадт А.М. Технологические особенности и перспективы производства инновационного древесно-минерального композита // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2019. № 7-8. С. 24–27.

5. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Конструкционная теплоизоляция на основе отходов деревообрабатывающей и горной промышленности // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 97–100.

6. Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // Известия вузов. Лесной журнал. 2024. № 4. С. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158.

7. Василик П.Г., Голубев И.В. Применение волокон в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2002. №9. С. 26–27.

8. Degrave-Lemeurs M., Glé P., de Menibus A.H., Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 160. Pp. 462–474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064

9. Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H., Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay // Applied Clay Science. 2016. Vol. 132–133. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.029.

10. Fernández R., Cuevas J., Mäder U.K., Modeling experimental results of diffusion of alkaline solutions through a compacted bentonite barrier // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40, Iss. 8. Pp. 1255–1264. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.011.

11. Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Belyaev A.O., Tyurin A.M., Maryandyshev P.A. and Samofalov V.Yu. Characteristics of polymineral powders of the mining and processing plant of severalmaz JSC // Inorganic Materials: Applied Research. 2025. Vol. 16 (1). Pp. 81–87. DOI: 10.1134/S2075113324701375.

12. Лесовик В.С., Володченко А.А. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 38–41.

Информация об авторах

Беляев Александр Олегович, аспирант кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: a.o.belyaev@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Данилов Виктор Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Капустин Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной и прикладной физики. E-mail: s.kapustin@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения реставрации и экологии в строительстве. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Третьяков Михаил Романович, студент. E-mail: tretyakov.m.r@edu.narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 22.

Поступила 19.02.2026 г.

© Беляев А.О., Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзенштадт А.М., Третьяков М.Р., 2026

Belyaev A.O., *Danilov V.E., Kapustin S.N., Ayzenshtadt A.M., Tretyakov M.R.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**E-mail: v.danilov@narfu.ru*

USING TAGUCHI ORTHOGONAL MATRIX TO OPTIMIZING THE COMPOSITION OF ORGANIC-MINERAL COMPOSITES

Abstract. *The article discusses the principles of using the Taguchi orthogonal matrix in optimizing the composition of a building material using the example of an organomineral composite based on mechanically activated saponite-containing raw materials, lime, wood flour and fibers of chemical-thermomechanical mass. The influence of the content of each component on the physical and mechanical properties of the composite was studied. The results of 16 series of experiments + 3 clarifying ones were analyzed, as a result of which a rational composition of the composite was established with strength characteristics 15% greater than those of the control composition at a lower (35%) density. This composition has a relatively low thermal conductivity coefficient of 0.11 W/(m K) and a flammability group of G1 (low flammability), which allows the use of sheets based on it, instead of gypsum fiber boards, for cladding structures that have increased fire safety requirements.*

Keywords: *saponite-containing material, organomineral composite, strength and thermal properties.*

REFERENCES

1. Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Samchenko S.V., Bruyako M.G. Use of pulp and paper industry waste in binding and cementitious materials technology [Ispol'zovanie othodov cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti v tekhnologii vyazhushchih i cementnyh sistem]. Nanotechnologies in Construction. 2024. Vol. 16 (4). Pp. 301–309. DOI: 10.15828/2075-8545-2024-16-4-301-309. EDN: GCICKX (rus)

2. Bogdanov A., Shatrova A., Kachor O. Use of the Accumulated Waste of the Pulp and Paper In-

dustry as a Component Raw Material for the Production of Cements [Ispol'zovanie nakoplenykh othodov cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti v kachestve komponentnogo syr'ya dlya polucheniya cementov]. Ecology and Industry of Russia. 2017. Vol. 21 (11). Pp. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-15-19. (rus)

3. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A. Increasing the efficiency of manufacturing products using wood composites [Uvelichenie rosta effektivnosti proizvodstva izdelij s ispol'zovaniem drevesnyh kompozitov]. Fundamental research. 2014. No. 8. Pp. 1550–1554. (rus)

4. Danilov V.E., Shinkaruk A.A., Ayzenshtadt A.M. Technological features and prospects for the production of innovative wood-mineral composites [Tekhnologicheskie osobennosti i perspektivy proizvodstva innovatsionnogo drevesno-mineral'nogo kompozita]. Construction materials, equipment, and technologies of the XXI century. 2019. No. 7-8. Pp. 24–27. (rus)
5. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Structural thermal insulation based on waste from the wood processing and mining industries [Konstrukcionnaya teploizolyaciya na osnove othodov derevoobrabatyvayushchej i gornoj promyshlennosti]. Industrial and civil construction. 2017. No. 1. Pp. 97–100. (rus)
6. Prokopiev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler [Ekspluatatsionnye harakteristiki drevesno-polimernyh kompozitov na osnove acetilirovannogo drevesnogo napolnitelya]. Russian Forestry Journal. 2024. No. 4. Pp. 147–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158. (rus)
7. Vasilik P.G., Golubev I.V. Application of fibers in dry building mixtures. [Primenenie volokon v suhikh stroitel'nyh smesyah]. Building materials. 2002. No. 9, Pp. 26–27. (rus)
8. Degrave-Lemeurs M., Glé P., de Menibus A.H. Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 160. Pp. 462–474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064
9. Keramatikerman M., Chegenizadeh A., Nikraz H. Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay. Applied Clay Science. 2016. Vol. 132–133. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.029.
10. Fernández R., Cuevas J., Mäder U.K. Modeling experimental results of diffusion of alkaline solutions through a compacted bentonite barrier. Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40 (8). Pp. 1255–1264. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.011.
11. Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Belyaev A.O., Tyurin A.M., Maryandyshev P.A. and Samofalov V.Yu. Characteristics of poly-mineral powders of the mining and processing plant of Severalmaz JSC. Inorganic Materials: Applied Research. 2025. Vol. 16 (1). Pp. 81–87. DOI: 10.1134/S2075113324701375.
12. Lesovik V.S., Volodchenko A.A. On the problem of technogenic metasomatism in building materials science [K probleme tekhnogenogo metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2015. No. 4. Pp. 38–41. (rus)
13. Urbanov A.V., Potapova E.N. Application of the Taguchi method in the study of cement property modifiers [Primenenie metoda Taguchi pri issledovanii modifikatorov svojstv cementa]. Advances in Chemistry and Chemical Engineering. 2024. Vol. 38 (2). Pp. 71–74. (rus)

Information about the authors

Belyaev, Alexander O. Postgraduate student. E-mail: a.o.belyaev@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Danilov, Victor E. PhD. Assistant professor. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Kapustin, Sergey N. PhD. Assistant professor. E-mail: s.kapustin@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Ayzenshtadt, Arkady M. DSc, Professor. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Tretyakov, Mikhail R. Student. E-mail: tretyakov.m.r@edu.narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb. 17.

Received 19.02.2026

Для цитирования:

Беляев А.О., Данилов В.Е., Капустин С.Н., Айзенштадт А.М., Третьяков М.Р. Использование ортогональной матрицы Тагучи при оптимизации состава органоминерального композита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16

For citation:

Belyaev A.O., Danilov V.E., Kapustin S.N., Ayzenshtadt A.M., Tretyakov M.R. Using taguchi orthogonal matrix to optimizing the composition of organic-mineral composites. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-8-16