

Выбор минеральных наполнителей для строительных композитных материалов с полимерной матрицей

Г.Б. Вержбовский, А.В. Залиев

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Для создания композитных строительных материалов с полимерной матрицей могут использоваться различные наполнители как растительного (древесно-полимерные композиты - ДПК), так и минерального (минерально-полимерные композиты - МПК) происхождения. В статье оценивается целесообразность применения в МПК двенадцати различных минералов с позиций прочности, стоимости и веса получаемых материалов в сравнении с аналогичными показателями ДПК. При последовательном рассмотрении каждого из оцениваемых параметров производится сокращение выборки наполнителей за счет исключения комбинаций с характеристиками хуже, чем у эталонного материала – древесно-полимерного бинарного композита, состоящего из древесной муки и полипропилена. Показано, что одними из наиболее эффективных минеральных наполнителей могут стать отходы предприятий строительной индустрии, а также утилизируемые при сносе зданий и сооружений конструкции.

Ключевые слова: композит, матрица, наполнитель, минерал, древесная мука, пыль, стоимость, объемный вес, прочность, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Наполнителями для строительных композитов с полимерной матрицей теоретически могут быть самые разнообразные материалы. В настоящее время наиболее широко для этой цели применяется древесная мука. Из древесно-пластмассового композита (ДПК) производится декинг или террасная доска [1]. Известны попытки использовать в качестве наполнителя мел, тальк и иные порошкообразные материалы [2-4]. В идеале наполнитель должен быть прочным, долговечным, экологически чистым, легким, дешевым и т.п.

При изготовлении изделий из ДПК первоначально происходит перемешивание расплавленного полимера – чаще всего полипропилена – с наполнителем и различными добавками, а затем получившаяся смесь пропускается через экструдер для создания необходимых элементов [5]. Подобный способ производства допускает использование разнообразных наполнителей, свойства которых могут варьироваться достаточно широко. В

связи с этим встает вопрос о целесообразности использования того или иного материала.

Одним из сдерживающих широкое применение ДПК факторов, является высокая стоимость итоговых изделий. Отчасти это обусловлено дороговизной производственной линии, однако определенный вклад в указанный показатель вносит и цена материалов. В России есть примеры изготовления изделий из композитов с минеральными наполнителями (МПК) [6]. Использование, например, мраморной муки позволяет получать изделия более высокой плотности и прочности, чем ДПК, стойкие к загрязнению, с низким водопоглощением и стойкостью к выцветанию. Стоимость мраморной муки в несколько раз меньше, чем аналогичный показатель древесной муки, что также говорит в пользу МПК.

Используемые в строительстве изделия должны быть прочными и долговечными, поэтому цена является важным, но далеко не единственным фактором, определяющим целесообразность их производства. Эксплуатационные характеристики композитов во многом зависят от их упругих характеристик – модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν . Как правило, последние определяются по результатам испытаний опытных образцов, что далеко не всегда удобно, поэтому известны аналитические приемы прогнозирования упругих характеристик материалов. В работе [7] приводятся формулы для определения указанных выше параметров двухкомпонентного композита, а в [8] показано, как можно использовать эти формулы при прогнозировании свойств многокомпонентных материалов.

Получим упругие характеристики МПК с различными минеральными наполнителями и определим оптимальные с позиций стоимости и прочности составы. Для этого рассмотрим несколько материалов, стоимость и свойства которых, взятые из открытых источников, приведены в таблице № 1. В эту таблицу для сравнения добавлена древесная мука, а также цементная пыль и

мелкий щебень. Два последних наполнителя МПК в настоящее время широко доступны в связи с последствиями ведения боевых действий в населенных пунктах восточной части Украины. К сожалению, многие здания и сооружения на освобождаемых территориях не подлежат восстановлению и сносятся, что приводит к появлению большого количества отходов, которые можно использовать повторно. Также возможно использовать пыль из различных материалов, в избытке имеющуюся на заводах стройиндустрии и в настоящее время практически не используемую.

Таблица № 1

Возможные наполнители композитных материалов с полимерной матрицей
и их отдельные характеристики

Наполнитель	Средняя цена за тонну, руб.	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Объемный вес γ , кг/м ³	K_c
древесная мука	11000	10000	0,5	450	0,909
асбест	17650	16000	0,3	2500	0,907
аэросил	9900	6500	0,15	2450	0,657
барит	11750	6000	0,28	4480	0,511
гипс	20000	1400	0,16	2300	0,070
каолин	5500	5000	0,25	2600	0,909
кварц	5750	7400	0,11	2600	1,287
мел	2050	8500	0,29	1800	4,146
мрамор	2000	30000	0,15	2650	15,000
мусковит (слюда)	22500	250	0,3	2700	0,011
тальк	3050	3500	0,25	2800	1,148
цементная пыль	950	19000	0,14	1400	20,000

щебень мелкий	550	20000	0,18	2600	36,364
---------------	-----	-------	------	------	---------------

Введем понятие «коэффициент экономичности материала» K_{Σ} , являющийся отношением модуля упругости материала к стоимости одной его тонны – последняя колонка таблицы № 1. Очевидно, что чем этот показатель выше, тем материал более экономичен и привлекателен для использования в строительстве. В рамках настоящей работы будем рассматривать далее только наполнители с K_{Σ} больше или равными величине этого показателя для древесной муки, т.е. 0,909, тогда из тринадцати перечисленных в таблице № 1 материалов возможно будет ограничиваться только восемью.

Перейдем к определению упругих характеристик МПК. Для этого воспользуемся следующими зависимостями [9]:

$$E_{\Sigma} = \frac{9K_{\Sigma}G_{\Sigma}}{3K_{\Sigma} + G_{\Sigma}}, \quad \nu_{\Sigma} = \frac{3K_{\Sigma} - 2G_{\Sigma}}{2(3K_{\Sigma} + G_{\Sigma})},$$

$$K_{\Sigma} = (K_1K_2)^{1/2} \frac{m_1K_1^{1/2} + m_2K_2^{1/2}s^{1/2}}{m_1K_2^{1/2} + m_2K_1^{1/2}s^{1/2}},$$

$$G_{\Sigma} = (G_1G_2)^{1/2} \frac{m_1G_1^{1/2} + m_2G_2^{1/2}s^{1/2}}{m_1G_2^{1/2} + m_2G_1^{1/2}s^{1/2}},$$

$$K_i = \frac{E_i}{3(1 - 2\nu_i)}, \quad s = \frac{E_1}{E_2}, \quad m_1 + m_2 = 1.$$

Здесь индексы «1» и «2» относятся к матрице и наполнителю соответственно, а « Σ » – к композиту в целом, m_i – объемные доли матрицы и наполнителя. Вслед за [2] будем рассматривать МПК с m_2 от 0,6, до 0,8.

В таблице № 2 приведены значения модулей упругости композитных материалов с полипропиленовой матрицей, различными наполнителями и их объемными долями. Из таблицы следует, что только три вида бинарных композитных материалов с полипропиленовой матрицей и минеральными

наполнителями имеют модули упругости, превышающие аналогичный показатель ДПК – мрамор, цементная пыль и мелкий щебень. Эти же наполнители имеют и наибольшие коэффициенты экономичности материала, что позволяет сделать предположение о возможности расширения класса минерально-пластмассовых композитных материалов за счет повторного использования утилизируемых строительных конструкций и отходов промышленности строительных материалов.

Таблица № 2

Модули упругости композитных материалов
с полипропиленовой матрицей и различными наполнителями

Наполнитель	Модуль упругости (МПа) при массовой доле наполнителя		
	0,6	0,7	0,8
древесная мука	2955	3588	4568
каолин	2563	2943	3448
кварц	2969	3555	4405
мел	2934	3536	4442
мрамор	3604	4683	6635
тальк	2245	2479	2761
цементная пыль	3464	4421	6067
щебень мелкий	3447	4402	6057

Немаловажным фактором, определяющим целесообразность использования в качестве наполнителя МПК тех или иных материалов, является вес итогового изделия. Определим объемный вес МПК при условии, что этот показатель для полипропилена составляет $\gamma_1=900\text{кг/м}^3$ [10]. Тогда, например, в случае композита с 60% мраморного наполнителя получим:

$$\gamma = m_1\gamma_1 + m_2\gamma_2 = 0,4 \cdot 900 + 0,6 \cdot 2650 = 1950 \text{ кг/м}^3.$$

Аналогичные результаты для других соотношений матрицы и наполнителя, а также иных минеральных материалов приведены в таблице № 3, а их графическое представление дано на рис. 1.

Таблица № 3

Объемные веса МПК

Наполнитель	Объемный вес МПК (кг/м ³) при массовой доле наполнителя		
	0,6	0,7	0,8
древесная мука	2955	3588	4568
мрамор	1950	4683	6635
цементная пыль	3464	4421	6067
щебень мелкий	3447	4402	6057

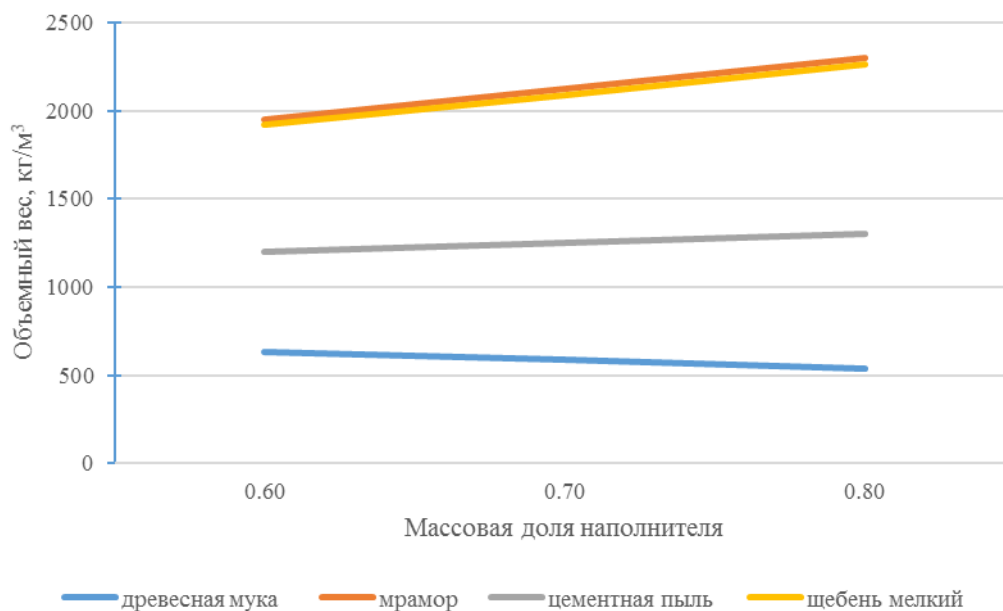


Рис. 1. – Зависимость объемного веса МПК от массовой доли наполнителя

Из рисунка видно, что с ростом массовой доли мрамора и мелкого щебня объемный вес МПК возрастает более чем втрое, в то время, как пыль и древесная мука изменяют объемный вес незначительно.

Что касается стоимости получаемого продукта, то с увеличением массовой доли всех четырех наполнителей она только снижается (рис. 2), так как наиболее дорогой составляющей стоимости МПК в рассматриваемом случае является полимерная матрица.

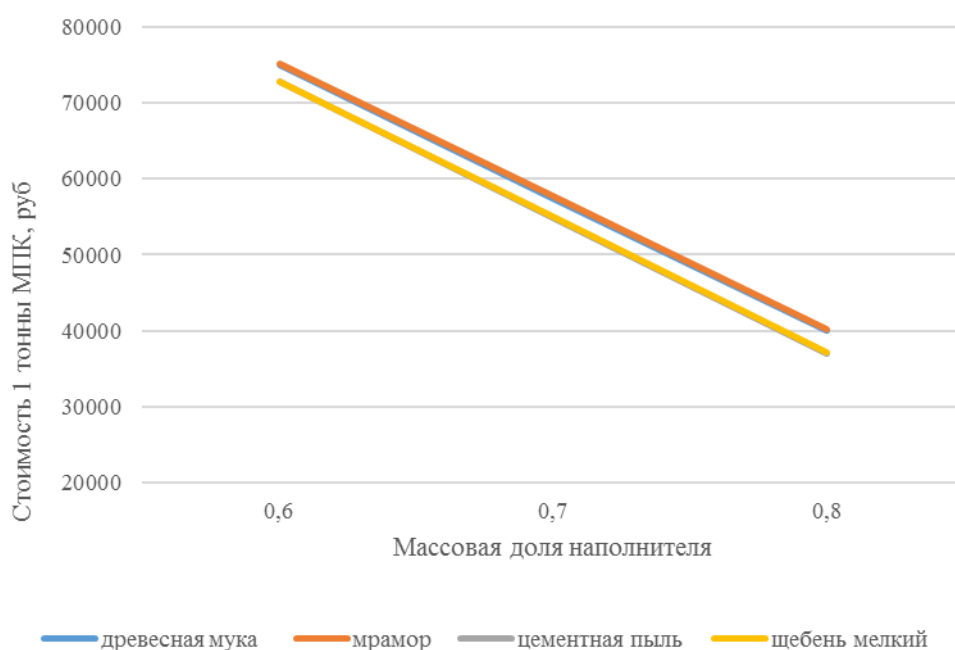


Рис. 2. – Зависимость стоимости МПК от массовой доли наполнителя

Таким образом, комплексная оценка возможности применения в полимерных композитах различных минеральных наполнителей показала целесообразность использования как отходов предприятий строительной индустрии, так и материалов, появляющихся при сносе зданий и сооружений. Переработка и повторное использование материалов также будет способствовать решению экологических проблем и снизит степень загрязнения окружающей среды.

Литература

1. Slaughter A. E. Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite. - Washington: State University, 2004. 161 p.
2. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. - СПб.: Изд-во НОТ, 2010. 735 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. - СПб.: Изд-во НОТ, 2013. 822 с.
4. Ochsner Andreas, Lucas F.M. Silva, Holm Altenbach. Mechanics and Properties of Composed Materials and Structures. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 195 p.
5. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. - СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
6. Уникальная доска из минерально-полимерного композита URL: mpk.roskompozit.ru/ - Заглавие с экрана. - (Дата обращения 19.09.2023).
7. Вержбовский Г.Б. Малоэтажные быстровозводимые здания и сооружения из композитных материалов. Ростов-на-Дону: П-Пресс, 2015. 280 с.
8. Вержбовский Г.Б. Прогнозирование физических свойств многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей // Инженерный вестник Дона, 2022, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829.
9. Вержбовский Г.Б. К расчету армированных изгибаемых элементов строительных конструкций из полимерных композиционных материалов с разномодульной нелинейно упругой матрицей // Инженерный вестник Дона, 2022, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7822.
10. Karger-Kocsis J. Polypropylene Structure, blends and Composites. - London-Glasgow: Chapman & Hall, 1995. 377 p.

References

1. Slaughter A. E. Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite. - Washington: State University, 2004. 161 p.
2. Klesov A.A. Drevesno-polimernye kompozity [Wood-polymer composites]. SPb.: Izd-vo NOT, 2010. 735 p.
3. Mihajlin Ju.A. Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy [Structural polymer composite materials]. - SPb.: Izd-vo NOT, 2013. 822 p.
4. Ochsner Andreas, Lucas F.M. Silva, Holm Altenbach. Mechanics and Properties of Composed Materials and Structures. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 195 p.
5. Kerber M.L. Polimernye kompozicionnye materialy. Struktura. Svoystva. Tehnologii. [Polymer composite materials. Structure. Properties. Technologies]. SPb.: Professija, 2008. 560 p.
6. Unikal'naja doska iz mineral'no-polimernogo kompozita [Unique board made of mineral-polymer composite]. URL: mpk.roskompozit.ru/. (Date accessed 19.09.2023).
7. Verzhbovskij G.B. Malojetazhnye bystrovozvodimye zdanija i sooruzhenija iz kompozitnyh materialov. [Low-rise fast-erected buildings and structures made of composite materials]. Rostov-na-Donu: P-Press, 2015. 280 p.
8. Verzhbovskij G.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829.
9. Verzhbovskij G.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7822.
10. Karger-Kocsis J. Polypropylene Structure, blends and Composites. London-Glasgow: Chapman & Hall, 1995. 377 p.