

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 624

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>


### Прогнозирование свойств многокомпонентных минерально-полимерных композитных материалов



EDN: XFIOHK

Г.Б. Вержбовский , А.В. Залиев 

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 [alan-zaliev@mail.ru](mailto:alan-zaliev@mail.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Прогресс строительной индустрии приводит к возникновению новых композитных материалов. Этому предшествуют экспериментальные исследования, в частности, аналитические приемы прогнозирования свойств новых материалов. В строительстве широкое распространение получили полимерные композитные материалы (ПКМ), которые хорошо зарекомендовали себя и в других отраслях промышленности. ПКМ имеют ряд особенностей, которые следует принимать во внимание в процессе разработки аналитических методик. Рассмотрение ПКМ происходит при условии изотропии конечного материала и подчинения правилу смеси при его изготовлении. Целью настоящего исследования является аналитическое определение прогнозируемых пределов прочности многокомпонентных композитных материалов с минеральными наполнителями.

**Материалы и методы.** Существуют различные методики определения характеристик полимерных композитов. Предложена интегральная методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона бинарного полимерного композитного материала, основанная на предположении, что между упругими потенциалами составных частей композита существует связь. Также показан переход аналитического прогнозирования характеристик от бинарного к многокомпонентному полимерному композитному материалу.

**Результаты исследования.** Важнейшей характеристикой строительных полимерных композитов является их прочность. Получена формула для аналитического определения прогнозируемого предела прочности бинарного полимерного композитного материала, также на основе данных формул получен прогнозируемый предел прочности для некоторых многокомпонентных полимерных композитных материалов.

**Обсуждение и заключение.** Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при формировании состава многокомпонентного полимерного композитного материала целесообразно сочетать наполнители с близкими по величине характеристиками, в частности, модулями упругости.

**Ключевые слова:** многокомпонентный полимерный композит, бинарный полимерный композит, полимерная матрица, порошковый наполнитель, правило смеси, модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль деформации, модуль сдвига, объемная доля, предел прочности

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

**Для цитирования.** Вержбовский Г.Б., Залиев А.В. Прогнозирование свойств многокомпонентных минерально-полимерных композитных материалов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(1):35–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>

## Forecasting the Properties of Multicomponent Mineral Polymer Composite Materials

Gennady B. Verzhbovskiy , Alan V. Zaliev 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ [alan-zaliev@mail.ru](mailto:alan-zaliev@mail.ru)

### Abstract

**Introduction.** Advances in the construction industry are causing new composite materials to emerge. This is preceded by experimental studies, particularly analytical techniques for predicting the properties of new materials. Polymer composite materials (PCMs) which have proved to be efficient in other industries are commonly utilized in construction as well. PCMs have a number of features that should be taken into consideration while developing analytical techniques. PCM is considered under the condition of isotropy of the final material and compliance with the mixture rule during its manufacture. The objective of the study is to analytically determine the predicted strength limits of multicomponent composite materials with mineral fillers.

**Materials and Methods.** There are diverse methods for identifying the characteristics of polymer composites. An integral method for determining the modulus of elasticity and the Poisson's ratio of a binary polymer composite material is set forth, based on the assumption that there is a relationship between the elastic potentials of the composite components. The transition of analytical forecasting of characteristics from binary to multicomponent polymer composite material is also shown.

**Results.** The major characteristic of building polymer composites is their strength. A formula has been obtained for the analytical determination of the predicted tensile strength of a binary polymer composite material, and the predicted tensile strength for some multicomponent polymer composite materials has been obtained based on these formulas as well.

**Discussion and Conclusion.** The results enable us to conclude that while forming the composition of a multicomponent polymer composite material, it is recommended that fillers with similar characteristics, in particular, elasticity modules are combined.

**Keywords:** multicomponent polymer composite, binary polymer composite, polymer matrix, powder filler, mixture rule, modulus of elasticity, Poisson's ratio, modulus of deformation, shear modulus, volume fraction, tensile strength

**Acknowledgements.** The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

**For citation.** Verzhbovskiy GB, Zaliev AV Forecasting the properties of multicomponent mineral polymer composite materials. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(1):35–40. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-1-35-40>

**Введение.** Развитие строительной индустрии приводит к возникновению всё новых и новых материалов, как правило, композитных. Этому предшествует этап экспериментальных исследований, при которых производится подбор рационального состава, а также испытания опытных образцов. Исследования могут оказаться продолжительными и затратными, поэтому интерес представляют аналитические приемы прогнозирования свойств новых материалов.

Композитные материалы с полимерной матрицей (ПКМ) нашли широкое применение в различных областях, в том числе, и в строительстве. Условимся рассматривать далее материалы с полимерной матрицей и одним или несколькими порошковыми наполнителями, образующимися при простом перемешивании указанных составляющих без каких-либо химических реакций между ними. В таком случае ПКМ подчиняются правилу смеси [1]. Также предположим, что композит в целом и его отдельные составляющие являются изотропными и подчиняются закону Гука.

Для указанных материалов необходимо получить аналитические выражения, позволяющие установить пределы прочности композита в зависимости от прочности его составляющих.

**Материалы и методы.** Существуют различные методики определения характеристик полимерных композитов, в которых предполагается, что все части материала испытывают одинаковые деформации [2] или равные напряжения [3], поэтому разработчики новых материалов пользуются обоими подходами, получают интервальную оценку свойств, которая впоследствии сужается по методикам Хашина–Штрикмана [4] или Мори–Танака [5].

В работе [6] предложена интегральная методика определения модуля упругости и коэффициента Пуассона бинарного материала с полимерной матрицей и порошковым наполнителем, основанная на предположении, что между упругими потенциалами составных частей композита существует связь (1).

$$s\sigma_1\varepsilon_1 = \sigma_2\varepsilon_2, \tag{1}$$

где индексы «1» и «2» относятся к матрице и наполнителю соответственно, а параметр  $s$  представляет собой отношение модулей упругости составляющих  $s = E_1/E_2$ .

В [6] получены формулы для определения модулей упругости и коэффициента Пуассона бинарного композита (2), выражаемые через объемные модули деформации и модули сдвига:

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

Величины, входящие в правые части выражений (2), определяются равенствами (3) и (4):

$$K_\Sigma = (K_1 K_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m_1 K_1^{\frac{1}{2}} + m_2 K_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}{m_1 K_1^{\frac{1}{2}} + m_2 K_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}, \tag{3}$$

$$G_\Sigma = (G_1 G_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{m_1 G_1^{\frac{1}{2}} + m_2 G_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}{m_1 G_1^{\frac{1}{2}} + m_2 G_2^{\frac{1}{2}} s^{\frac{1}{2}}}. \tag{4}$$

В последних выражениях индекс « $\Sigma$ » относится к композиту в целом, а  $m_1$  и  $m_2$  — объемные доли матрицы и наполнителя соответственно, причем  $m_1 + m_2 = 1$ .

Приведенные в [6] примеры бинарных композитов с полипропиленовой матрицей и различными наполнителями показали хорошее совпадение теоретических результатов с указанными в [7] экспериментальными значениями — расхождение не превышает 10 %.

Составы ПКМ становятся все более и более сложными, появились материалы с двумя и более наполнителями [8], для которых также желательно иметь аналогичные методики прогнозирования их характеристик. В [9] показано, каким образом зависимости (2) могут быть распространены и на композиты более сложного состава. Для ПКМ, состоящего из  $n$  компонентов, выражения (2) необходимо применить  $(n - 1)$  раз, последовательно добавляя к бинарному композиту новые составляющие. На каждом шаге сумма объемных долей бинарного материала принимается за единицу.

**Результаты исследования.** В [9] в качестве примера определены модуль упругости и коэффициент Пуассона для трехкомпонентного ПКМ с полипропиленовой матрицей (40 %) и наполнителями из древесной муки (50 %) и мела (10 %). При этом рассмотрены два варианта «начального материала» — бинарного композита для оценки зависимости итоговых результатов от порядка учета наполнителей (таблица 1). Все значения в таблице, за исключением безразмерных, приведены в МПа.

Таблица 1

Модули объемной деформации композитов с полипропиленовой матрицей

Композит	Матрица			Наполнитель			$K_\Sigma$	$G_\Sigma$	$s$	$E_\Sigma$	$\nu_\Sigma$
	$m_1$	$K_1$	$G_1$	$m_2$	$K_2$	$G_2$					
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и древесная мука (Д)											
ПП + Д	0,44	2917	493	0,56	8333	3846	4091	974	0,14	2707	0,39
Итог	0,9	4091	974	0,1	7500	3462	4237	1052	0,3	<b>2914</b>	<b>0,385</b>
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и мел (М)											
ПП + М	0,8	2917	493	0,2	7500	3462	3182	599	0,16	1692	0,41
Итог	0,5	3182	599	0,5	8333	3846	4226	1053	0,17	<b>2917</b>	<b>0,385</b>

Из таблицы 1 видно, что выделенные итоговые искомые значения не зависят от порядка учета наполнителей.

Наполнителями для строительных композитов с полимерной матрицей могут быть самые разнообразные материалы. Обычно для этой цели применяется древесная мука — древесно-полимерный композит (ДПК). Известны попытки использовать в качестве наполнителя мел, тальк, мраморную муку и иные порошкообразные материалы — минерально-полимерные композиты (МПК) [7, 10, 11].

Факторами, сдерживающими широкое применение упомянутых композитов в строительстве, являются сложная технология изготовления изделий с применением сложного экструзионного оборудования и высокая стоимость конечных изделий. Тем не менее организовать недорогое массовое производство композитных изделий возможно в случае перехода от экструзионной технологии к литьевой. Последняя в настоящее время используется при изготовлении минерально-полимерной тротуарной плитки. Снизить стоимость изделий возможно также за счет использо-

вания в качестве наполнителя мелкозернистого боя строительных конструкций или отходов предприятий стройиндустрии, которые в большинстве случаев просто утилизируются. Также возможно использовать пыль, образующуюся на заводах стройиндустрии и в большинстве случаев просто утилизирующуюся.

Рассмотрим несколько материалов, стоимость и свойства которых, взятые из открытых источников, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики возможных наполнителей

ПКМНаполнитель	Средняя цена за тонну, руб.	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$K_3$
древесная мука	11000	10000	0,3	450	<b>0,909</b>
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

Заметим, что величина коэффициента Пуассона для древесной муки в таблице 2 отличается от известного значения для древесины. Отличие объясняется тем, что мелкие частицы древесной муки становятся изотропными, так как при таких размерах частиц пропадает влияние на этот коэффициент особенностей строения исходного материала.

Относительная дороговизна композитных изделий может быть уменьшена за счет использования более дешевых наполнителей, поэтому в последнем столбце таблицы 2 приведены отношения модуля упругости наполнителя к его стоимости — коэффициент экономичности наполнителя. Очевидно, что чем выше значение  $K_3$ , тем композит дешевле. Если принять древесную муку за базовый материал, то интерес будут представлять наполнители,  $K_3$  которых не менее 0,909. Эти материалы выделены в таблице 2.

Важнейшей характеристикой строительных полимерных композитов является их прочность. В [6] получена формула для аналитического определения прогнозируемого предела прочности бинарного ПКМ:

$$\sigma_{сж\Sigma} = \frac{3K_i - 2G_i}{3K_i t_i - 2G_i r_i} \sigma_i, \tag{5}$$

причем

$$t_1 = \frac{G_1^{1/2}}{m_1 G_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 G_2^{1/2}}, t_2 = \frac{s^{1/2} G_2^{1/2}}{m_1 G_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 G_2^{1/2}}, \tag{6}$$

$$r_1 = \frac{K_1^{1/2}}{m_1 K_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 K_2^{1/2}}, t_2 = \frac{s^{1/2} K_2^{1/2}}{m_1 K_1^{1/2} + s^{1/2} m_2 K_2^{1/2}}. \tag{7}$$

Предел прочности композита принимается минимальным из двух расчетов, выполненных для  $i$ , равного 1 и 2.

(5) возможно использовать и для прогнозирования свойств многокомпонентных материалов, что доказывают результаты, представленные в таблице 3, где также рассмотрена комбинация наполнителей мел и древесная мука (таблица 1).

Таблица 3

Предел прочности композита при сжатии, МПа

Композит	Матрица			Наполнитель			$K_\Sigma$	$G_\Sigma$	$s$	$\sigma_{сж1}$	$\sigma_{сж2}$
	$m_1$	$K_1$	$G_1$	$m_2$	$K_2$	$G_2$					
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и древесная мука (Д)											
ПП + Д	0,44	2917	493	0,56	8333	3846	4091	974	0,14	31,1	26,8
Итог	0,9	4091	974	0,1	7500	3462	4237	1052	0,3	<b>27,0</b>	<b>17,4</b>
«Начальный материал» — полипропилен (ПП) и мел (М)											
ПП + М	0,8	2917	493	0,2	7500	3462	3182	599	0,16	29,9	16,8
Итог	0,5	3182	599	0,5	8333	3846	4226	1053	0,17	<b>17,7</b>	<b>26,8</b>

**Обсуждение и заключение.** Таким образом, получены аналитические формулы для прогнозирования прочности многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей и минеральными наполнителями, позволяющие существенно сократить время, затрачиваемое на разработку новых материалов, за счет уменьшения количества физических экспериментов. Численные результаты, приведенные в таблице 3, позволяют сделать вывод о том, что при формировании состава многокомпонентного ПКМ целесообразно сочетать наполнители с близкими по величине модулями упругости. Из материалов, перечисленных в таблице 2, предпочтение следует отдать мрамору, цементной пыли и мелкому щебню. Эти наполнители могут быть получены в результате переработки сносимых зданий и сооружений, в том числе, в районах боевых действий. Прочность многокомпонентных ПКМ, рассмотренных в статье, оказывается достаточной для изготовления из них стеновых блоков, которые могут производиться непосредственно в районах строительства и использоваться в качестве материала для возведения стен и перегородок строений различного назначения.

#### Список литературы/References

1. Бартенев Г.В., Зеленов Ю.В. *Физика полимеров*. М.: Высшая школа; 1982. 280 с. Bartenev GV, Zelenev YuV. *Physics of Polymers*. Moscow: Higher School; 1982. 280 p. (In Russ.).
2. Voigt V. *Lehrbuch der Kristallphysik*. Berlin: Teubner; 1928. 962 p.
3. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1929;9(1):49–58. <http://dx.doi.org/10.1002/zamm.19290090104>
4. Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1963;11:127–140. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
5. Klusemann B. Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks. *Technische Mechanik*. 2010;30(4):374–386. URL: [https://www.researchgate.net/publication/256374208\\_Homogenization\\_methods\\_for\\_multi-phase\\_elastic\\_composites\\_Comparisons\\_and\\_benchmarks](https://www.researchgate.net/publication/256374208_Homogenization_methods_for_multi-phase_elastic_composites_Comparisons_and_benchmarks) (дата обращения 15.01.2025).
6. Вержбовский Г.Б. *Малоэтажные быстровозводимые здания и сооружения из композитных материалов*. Ростов-на-Дону: П-Пресс; 2015. 280 с. Verzhbovsky GB. *Low-rise Prefabricated Buildings and Structures Made of Composite Materials*. Rostov-on-Don: P-Press; 2015. 280 p. (In Russ.).
7. Клесов А.А. *Древесно-полимерные композиты*. СПб.: НОТ; 2010. 735 с. Klesov AA. *Wood-polymer Composites*. St. Petersburg: NOT; 2010. 735 p. (In Russ.).
8. Саввинова М.Е., Петухова Е.С. Выбор перспективных наполнителей для полиэтиленов ПЭ80Б и ПЭ2НТ11. *Инженерный вестник Дона*. 2013;1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518> (дата обращения 15.01.2025). Savvinova ME, Petukhova ES. Choice of Promising Fillers for Polyethylene PE80B and PE2HT11. *Don Engineering Bulletin*. 2013;1. (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1518> (accessed: 15.01.2025).
9. Вержбовский Г.Б. Прогнозирование физических свойств многокомпонентных композитных материалов с полимерной матрицей. *Инженерный вестник Дона*. 2022;7. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829> (дата обращения 15.02.2025). Verzhbovsky GB. Forecasting the Physical Properties of Multicomponent Composite Materials with a Polymer Matrix. *Don Engineering Bulletin*. 2022;7, (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7829> (accessed: 15.01.2025).
10. Михайлин Ю.А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. СПб.: НОТ; 2013. 822 с. Mikhailin YuA. *Structural Polymer Composite Materials*. St. Petersburg: NOT; 2013. 822 p. (In Russ.).
11. Ochsner A, Silva LFM, Altenbach H. *Mechanics and Properties of Composed Materials and Structures*. Berlin Heidelberg: SpringerVerlag; 2012. 195 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31497>

#### Об авторах:

**Вержбовский Геннадий Бернадович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](#), [ORCID](#), [vergen2005@yandex.ru](mailto:vergen2005@yandex.ru)

**Залиев Алан Витальевич**, аспирант кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [alan-zaliev@mail.ru](mailto:alan-zaliev@mail.ru)

***Заявленный вклад авторов:***

**Г.Б. Вержбовский:** научное руководство, формирование концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

**А.В. Залиев:** проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

***Конфликт интересов:*** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи***

***About the Authors:***

**Gennady B. Verzhbovskiy:** Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures at the Don State Technical University (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), [ResearcherID](#), [ORCID](#), [vergen2005@yandex.ru](mailto:vergen2005@yandex.ru)

**Alan V. Zaliiev:** Postgraduate student of the Department of Metal, Wood and Plastic Structures at the Don State Technical University (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), [ORCID](#), [alan-zaliiev@mail.ru](mailto:alan-zaliiev@mail.ru)

***Claimed Contributorship:***

**GB Verzhbovskiy:** scientific supervision, concept formation, analysis of research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

**AV Zaliiev:** performing the calculations, preparing the manuscript, forming the conclusions.

***Conflict of interest statement:*** the authors do not have any conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 24.01.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 05.02.2025

**Принята к публикации / Accepted** 20.02.2025