

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 4 / 2025, Vol. 8, Iss. 4 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 620.22-419

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-2

Сравнение модифицирующего действия волластонита в поливинилхлоридных и эпоксидных композитных материалах

¹ Соколова А.Г. *,
² Готлиб Е.М.,

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

² Казанский национальный исследовательский технологический университет,

* Ответственный автор E-mail: as.falconi@yandex.ru

Аннотация: цели: исследовать гранулометрический, фазовый составы и свойства наполнителей природного и синтетического волластонита и установить характер их модифицирующего действия в полимерных композитных материалах на примере термопласта поливинилхлорида и реактопласта эпоксидной смолы.

Методы. Для исследования образцов наполнителей был использован рентгенографический количественный фазовый анализ, пористость определяли методом ртутной порометрии и газопоглощения. Размер частиц волластонита определяли по методу лазерной дифракции. Термостабильность наполненных композитов оценивали на дериватографе, термостабильность поливинилхлоридных материалов оценивалось методом «Конго-красный». Динамический механический анализ проводили на приборе DMA 242 Netzsch.

Результаты. Изучены гранулометрический, фазовый состав образцов природного и синтетического силиката кальция, показатели их пористости и pH водной вытяжки. Установлено влияние свойств волластонита на вязкость полученных смесей полимер-наполнитель, термостабильность, износостойкость наполненных композитов, а также для поливинилхлоридных композиций - на показатели прочности на растяжение и относительное удлинение.

Выводы. Оба изученных силиката кальция показали свою эффективность как для эпоксидных, так и для поливинилхлоридных материалов. Несмотря на схожесть фазового состава и кислотно-основные характеристики поверхности, природный и синтетический волластонит отличаются по гранулометрическому составу и пористости. Природный наполнитель более перспективен для создания термостойких поливинилхлоридных композиций и износостойких эпоксидных композиций, в то время как синтетический волластонит на основе рисовой шелухи обеспечивает рост динамического модуля и температуры стеклования обоих типов полимеров. Исследования показали, что модифицирующее действие изученных наполнителей более существенно в эпоксидных полимерах благодаря их влиянию на формирование сетчатой структуры полимерной матрицы.

Ключевые слова: синтетический и природный волластонит, модификация, наполнитель, эпоксидные композиционные материалы, поливинилхлорид, средний размер кристаллитов, термостабильность

Для цитирования: Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Сравнение модифицирующего действия волластонита в поливинилхлоридных и эпоксидных композитных материалах // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 4. 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-2

Поступила в редакцию: 6 июня 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 28 августа 2025 г.; Принята к публикации: 27 октября 2025 г.

Comparison of modifying effect of wollastonite in polyvinylchloride and epoxy composite materials

¹ Sokolova A.G.,
² Gotlib E.M.,

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering,

² Kazan National Research Technological University,

* Corresponding author E-mail: as.falconi@yandex.ru

Abstract: Objectives: to investigate the grain-size and phase compositions and properties of natural and synthetic wollastonite fillers and to establish the nature of their modifying effect in polymer composite materials using the example of polyvinyl chloride thermoplastic and epoxy resin thermoset.

Methods. X-ray quantitative phase analysis was used to study the filler samples, and porosity was determined using mercury porosimetry and gas absorption. The particle size of wollastonite was determined by laser diffraction. The thermal stability of the filled composites was evaluated on a derivative thermogravimetric analyser, and the thermal stability of polyvinyl chloride materials was evaluated using the Congo red method. Dynamic mechanical analysis was performed on a DMA 242 Netzsch device.

Results. The particle size distribution and phase composition of natural and synthetic calcium silicate samples, their porosity and pH of aqueous extract were studied. The influence of wollastonite properties on the viscosity of the obtained polymer-filler mixtures, the thermal stability and wear resistance of the filled composites, as well as on the tensile strength and relative elongation of polyvinyl chloride compositions was established.

Conclusions. Studied calcium silicates have proven effective for both epoxy and polyvinyl chloride materials. Despite the similarity in phase composition and acid-base characteristics of the surface, natural and synthetic wollastonite differ in particle size distribution and porosity. Natural filler is more promising for creating heat-resistant polyvinyl chloride compositions and wear-resistant epoxy compositions, while synthetic wollastonite based on rice husks provides an increase in the dynamic modulus and glass transition temperature of both types of polymers. Studies have shown that the modifying effect of the studied fillers is more prominent in epoxy polymers due to their influence on the formation of the polymer matrix cross-linked structure.

Keywords: natural and synthetic wollastonite, modification, filler, epoxy composite materials, polyvinylchloride, average crystallite size, thermal resistance

For citation: Sokolova A.G., Gotlib E.M. Comparison of modifying effect of wollastonite in polyvinylchloride and epoxy composite materials. Chemical Bulletin. 2025. 8 (4). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-2

The article was submitted: June 6, 2025; Approved after reviewing: August 28, 2025; Accepted for publication: October 27, 2025.

Введение

Эпоксидные смолы и поливинилхлорид (ПВХ) являются крупнотоннажными полимерами, и композиты на их основе широко применяются в строительной индустрии в качестве отделочных покрытий, в автомобилестроении и других областях техники [1, 2]. Эффективным наполнителем как эпоксидных полимеров, так и поливинилхлорида является волластонит [3, 4]. В данной связи сравнение эффективности его модифицирующего действия в данных термо- и реактопластах представляет несомненный научный интерес.

Материалы и методы исследований

Эпоксидные композиции получали на основе диановой смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отверждаемой аминоалкилфенолом АФ-2 (ТУ 2494-052-00205423-2004) при комнатной температуре в течение 7 суток.

Поливинилхлоридные материалы получали на основе эмульсионного ПВХ-Е-6250-Ж (ГОСТ 14039-78) с константой Фикентчера-63.

В качестве наполнителей применялись:

- природный волластонит (ПВ) марки Миволл 10-97 (ТУ 577-006-40705684-2003) с характеристическим отношением длины к диаметру зерен 15:1;

- синтетический волластонит (СВ), полученный твердофазным методом [5] в течение 3 часов при 900°C на основе оксида кальция из известняка и диоксида кремния на основе золы рисовой шелухи, при молярном соотношении $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1,2:1$.

Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) образцов силикатов кальция проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab (рис. 1а) при параметрах съёмки: угловой интервал от 3-65 ° с шагом сканирования 0,02. Обработка и расшифровка дифрактограмм

осуществлялась в программном пакете PDXL-2 с применением базы данных ICDD PDF-2 Паули. Расчет микроструктурных параметров проводился методом Халдера-Вагнера.

Для определения π (ISO 9277:2010) с использованием прибора Quantachrome Nova 1200e произ-

водства Австрии (рис.1б). Метод ВЖН (Barrett-Joynner-Halenda) применяли для определения общего объема пор, метод БЭТ – для измерения площади удельной поверхности пор наполнителя.



а)



б)

Рис. 1. Измерительное оборудование Комплексной лаборатории «НаноАналитика», КНИТУ, Казань: а) дифрактометр Rigaku SmartLab; б) Анализатор размера пор и площади поверхности NOVA 1200 QUANTACHROME.

Fig. 1. Measuring equipment of the Complex laboratory “NanoAnalytics”, KNRTU, Kazan: a) X-ray diffraction meter Rigaku SmartLab; b) analyzer of pores size and surface area NOVA 1200 QUANTACHROME.

Размер частиц исследуемых наполнителей определяли по методу лазерной дифракции по ГОСТ Р 8.777-2011. Для определения рН водных суспензий образцов использовали комбинированный измеритель SevenMulti по ГОСТ 21119.3-9.

Для оценки износостойкости эпоксидных покрытий применяли вертикальный оптический длиномер ИЗВ-1 при следующих параметрах – скорость скольжения 1 м/сек, удельное давление контртела на испытываемую поверхность образца 1 МПа.

Исследования термостабильности эпоксидных и поливинилхлоридных материалов производились на приборе синхронного термического анализа (дериватографе) фирмы Netzsch – (Германия) в температурном интервале 25 – 600 °С, при скорости нагрева 10 °С/мин, в алюминиевом тигле, в атмосфере воздуха, который продувался со скоростью 20 мл/мин.

Определение термостабильности ПВХ материалов проводилось согласно ГОСТ 14041-91 методом «Конго-красный» при 180 °С.

Динамический механический анализ проводили на приборе DMA 242 Netzsch, частота 1 Гц в атмосфере аргона, скорость потока газа 50 мл/мин, для эпоксидных композиций температурный интервал составлял от 20 до 300 °С, для ПВХ композиций – от 20 до 70 °С.

Для поливинилхлоридных композиций прочность на растяжение и относительное удлинение определяли в соответствии с ГОСТ 270-75. Для оценки вязкости ПВХ композиций использовали ротационный вискозиметр Брукфильда LVDV-II производства США, скорость вращения шпинделя составляла 64 об/мин.

Результаты и обсуждения

Существенный вклад в степень взаимодействия наполнителей с полимерной матрицей вносит их фазовый и гранулометрический состав, характеристики кристаллической структуры, кислотно-основные свойства поверхности и пористость [6, 7].

Таблица 1

Фазовый состав, pH водной вытяжки, средний размер частиц и кристаллитов образцов волластонита.

Table 1

Phase composition, pH of aqueous extract, mean particles and crystallite size of wollastonite samples.

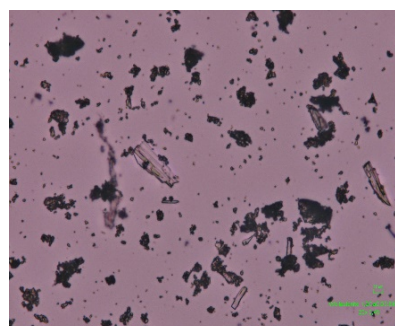
Волластонит	Фазовый состав, % масс.	Средний размер частиц, мкм/Средний размер кристаллитов, нм	pH водной вытяжки
Синтетический волластонит (СВ)	β -волластонит – 78 ларнит – 22	13,5/2790	11,8
Природный волластонит (ПВ)	β -волластонит – 80 кварц – 2 глинистые минералы (хлорит и мусковит) – 9 Кальцит – 9	5,2/5850	10,7

Согласно полученным данным (табл. 1), природный волластонит является более мелкодисперсным, по сравнению с синтетическим аналогом. pH водной вытяжки этих наполнителей свидетельствует о щелочном характере их поверхно-

сти. Оба наполнителя содержат примерно одинаковое количество β -волластонита и отличаются составом примесных компонентов. Для синтетического силиката кальция характерен меньший средний размер кристаллитов.



а)



б)

Рис. 2. Структура волластонита: а- природный минерал Миволл 10-97, б- синтетический волластонит с молярным содержанием $\text{CaCO}_3:\text{SiO}_2 = 1,2:1$, при увеличении 100.

Fig. 2. Wollastonite structure: а- natural wollastonite Miwoll 10-97, б – synthetic wollastonite with molar ratio $\text{CaCO}_3:\text{SiO}_2 = 1.2:1$, resolving power of microscope 100.

Рис. 2 наглядно демонстрирует игольчатую форму частиц волластонита с пространственно-геометрической анизотропностью. Именно иголь-

чатая форма частиц обеспечивает высокую прочность и твердость наполненных композиций, а также стойкость к абразивному износу.

Таблица 2

Характеристики пористости волластонита.

Table 2

Wollastonite porosity parameters.

Волластонит	Удельная поверхность пор БЭТ, $\text{м}^2/\text{г}$	Общий объем пор по ВЖ, $\text{см}^3/\text{г}$	Средний диаметр пор по ВЖ, нм
СВ	17,9	0,08	4,1
ПВ	3,9	0,02	3,5

Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что природный волластонит является существенно менее пористым, чем СВ, у него в 4 раза меньше общий объем пор.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что исследованные наполнители су-

щественно отличаются по своему гранулометрическому составу, кристалличности и пористости, что оказывает влияние на их модифицирующий эффект в полимерных композициях.

В случае эпоксидных смол имеет место формирование их сетчатой структуры в присутствии по-

верхности волластонита, что позволяет ему управлять процессом структурообразования, его скоростью и степенью превращения функциональных групп [8]. Ввиду избирательной адсорбции в поверхностных слоях наполнителя возможно образование граничного слоя, содержащего избыток или недостаток отвердителя [9]. Недостаток отвердителя замедляет процесс отверждения эпоксидной смолы.

Это, вероятно, и является причиной роста жизнеспособности (до 1,5 раз) при наполнении эпоксидных полимеров природным и синтетическим волластонитом.

Исследование времени желатинизации наполненных эпоксидных композиций показало, что оно выше при применении синтетического волластонита (рис. 3).

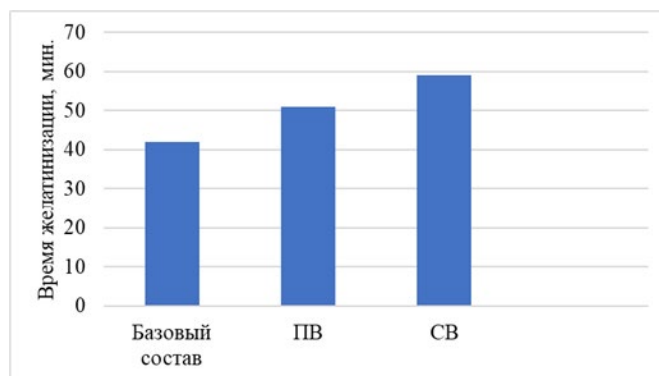


Рис. 3. Зависимость жизнеспособности эпоксидных композиций от типа наполнителей, при содержании их 10 масс. ч.

Fig. 3. Dependency of epoxy compositions working life on the filler type, at its content 10% wt.

Известно [10], что изменение вязкости при смешении компонентов позволяет оценить степень их взаимодействия. Так, установлено, что при смешении эпоксиолигомеров с волластонитом

происходит рост вязкости (табл.3), который выше в случае природного минерала, возможно, из-за его большей дисперсности (табл. 1).

Таблица 3

Вязкость смесей эпоксидная смола-наполнитель.

Table 3

Viscosity of mixture epoxy resin-filler.

Состав смеси смола-наполнитель	Вязкость, Па·с
ЭД-20	12200
ЭД-20 + ПВ	16360
ЭД-20 + СВ	14155

С другой стороны, более высокая вязкость реакционной системы при наполнении ПВ может затруднять взаимодействие с отвердителем, что сказывается на времени гелеобразования (рис. 3).

Таблица 4

Вязкость систем ПВХ-волластонит.

Table 4

Viscosity of the systems PVC – wollastonite.

Состав системы ПВХ-наполнитель	Вязкость, Па·с
ПВХ	16,9
ПВХ + ПВ	17,2
ПВХ + СВ	17,9

Рост вязкости имеет место и при смешении волластонита с ПВХ (табл.4), причем степень увеличения этого показателя у поливинилхлорида существенно меньше, чем у эпоксидных смол. Так,

вязкость ПВХ при наполнении растет, примерно на 5-6 %, а эпоксидных смол - на 16-34 %.

Это указывает, на наш взгляд, на значительно большую эффективность взаимодействия с напол-

нителями эпоксиолигомеров, по сравнению с поливинилхлоридом.

При наполнении волластонитом наблюдается рост износостойкости эпоксидных материалов (рис. 4), который обусловлен возникновением препятствий развитию деформаций в полимерной матрице [12], в результате возрастания жесткости наполненного композита.

Несколько большую (примерно на 10%) износостойкость обеспечивает ПВ, из-за меньшего диаметра его частиц и большего размера кристаллов (табл. 1), способствующего увеличению жесткости наполненного композита.

Известно, что гранулометрический состав наполнителя влияет на характер распределения его в полимерной матрице и эффективность взаимодействия на межфазной границе [11].

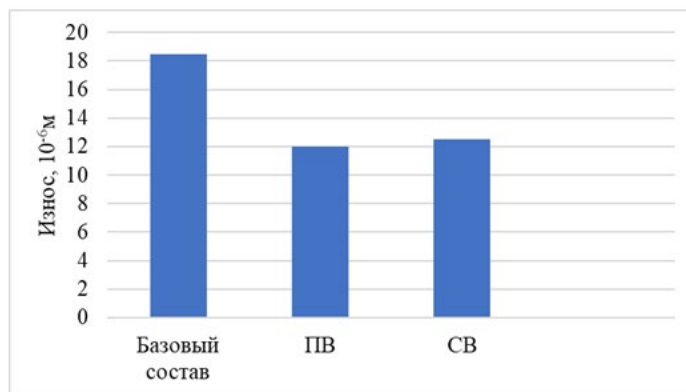


Рис. 4. Степень износа эпоксидных композиций, наполненных 10 масс.ч. ПВ и СВ.

Fig. 4. Wear degree of epoxy compositions filled with 10% wt. of natural and synthetic wollastonite.

Волластонит, как природный, так и синтетический заметно увеличивает прочность ПВХ материалов, при достаточно высоком относительном удлинении. Это эффект выше при применении СВ (табл. 5).

Характеристики кристаллической структуры наполнителей влияют на их модифицирующий эффект в полимерах. Меньший размер кристаллов синтетического волластонита способствует увеличению площади контакта с полимерной матрицей, что обуславливает большие межмолекулярные взаимодействия и может улучшить механические свойства композитов [13].

Более высокий модифицирующий эффект синтетического волластонита может быть связан с его развитой пористой структурой (табл. 2), что является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность взаимодействия наполнителя и полимера, происходящего, в значительной степени, за счёт сорбционных процессов [14].

Термостабильность ПВХ композиций растет при применении волластонита, так как на этот показатель [15] существенно влияют кислотно-основные характеристики поверхности минеральных наполнителей.

Таблица 5

Свойства ПВХ композиций, модифицированных 10 масс.ч. природного и синтетического волластонита.

Table 5

Properties of PVC compositions modified by 10 % wt. of natural and synthetic wollastonite.

Образец	Термостабильность, мин.	Условная прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %
Не наполненный	2,9	3,4	157
СВ	4,1	4,6	145
ПВ	4,8	4,3	153

Возможная реакция исследуемых силикатов кальция с хлористым водородом, выделяющимся из поливинилхлорида при термодеструкции при-

водит к росту термостабильности наполненных ПВХ материалов с щелочной природой поверхности (табл. 1) [15].

Характеристические температуры потери массы образцов ПВХ, наполненных волластонитом.

Таблица 6

Table 6

Characteristic temperatures of mass loss of PVC samples filled with wollastonite.

Наполнитель	Температура начала деструкции, °С	Температура 50%-ной потери массы, °С
Не наполненный	114	316
СВ	118	323
ПВ	123	332

Большой рост описываемого показателя наблюдается при применении ПВ, как менее пористого и более мелкодисперсного (табл. 1 и 2).

Температуры начала и 50 %-ной потери массы эпоксидных композиций.

Таблица 7

Table 7

Temperatures of onset and 50% mass loss of epoxy compositions.

Наполнитель	Температура начала деструкции, °С	Температура 50%-ной потери массы, °С
Не наполненный	331	405
СВ	354	432
ПВ	343	419

Примечание: содержание наполнителя 10 масс. ч. на 100 масс. ч. ЭД-20.

Note: filler content is 10 parts by weight per 100 parts by weight of ED-20.

Термическая стабильность эпоксидных материалов с волластонитом тоже несколько выше (табл. 7), чем у не наполненного полимера, причем большой термостабилизирующий эффект оказывает синтетический наполнитель. Это коррелирует с большим влиянием его на процесс отверждения, на что указывает величина роста жизнеспособности (рис.3).

Данные динамического механического анализа ПВХ композиций, наполненных волластонитом, показывают более высокие значения температуры их стеклования (по данным табл. 8). Меньший общий объём пор природного аналога обеспечивает меньшее повышение температуры перехода полимерной композиции из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Оба исследованных наполнителя повышают динамический модуль наполненных ПВХ материалов, в большей степени при применении

синтетического волластонита. Данный эффект связан с более высоким содержанием гидроксильных групп у силиката кальция, полученного на основе золы рисовой шелухи с щелочной природой поверхности [16].

Синтетический и природный волластонит (табл. 8), аналогично ПВХ, повышают температуру перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние, наполненных ими эпоксидных материалов. Более высокие значения температуры стеклования, как и динамического модуля имеют эпоксидные композиции, наполненные СВ.

Это можно связать с меньшим размером кристаллитов синтетического волластонита, и, следовательно, с большей доступностью его поверхности для взаимодействия с полимерной матрицей, в результате чего площадь контакта с межструктурными участками наполнителя значительно растёт.

Характеристики релаксационных процессов в наполненных волластонитом эпоксидных композициях.

Таблица 8

Table 8

Parameters of relaxation processes in epoxy compositions filled with wollastonite.

Тип наполнителя	Температура α – перехода, °С	Динамический модуль, МПа	Высота максимума тангенса угла механических потерь
Не наполненный	60	81	1,6
ПВ	75	96	1,3
СВ	90	98	1,5

Для обеспечения большей термостойкости для ПВХ композиций более перспективен природный минерал, а эпоксидных материалов – синтетический силикат кальция.

Большую износостойкость композитам на основе эпоксидной смолы придает ПВ. а более высокий динамический модуль и температуру стеклования, как и в случае поливинилхлоридных материалов, обеспечивает СВ.

Условная прочность при растяжении выше у ПВХ также при наполнении синтетическим волластонитом.

Таким образом, фазовый и гранулометрический состав, пористость и размер кристаллитов волластонита заметным образом влияют на величину его модифицирующего действия в эпоксидных и поливинилхлоридных материалах.

По-видимому, влияние того или иного показателя на разные свойства наполненных материалов являются различным, и тот или иной фактор становится доминирующим.

Следует сделать акцент на большем изменении релаксационных свойств эпоксидных композитов при наполнении волластонитом, по сравнению с ПВХ. Так, рост динамического модуля у термореактивного полимера наблюдается до 21 %, а у термопласта составляет примерно 13 %. Температура стеклования растет у ПВХ при наполнении волластонитом на 15 °С, а у эпоксидного композита с СВ -на 30 °С.

Аналогичные закономерности имеют место при сравнении термостабильности наполненных материалов с базовым составом. Так у ПВХ, при введении волластонита температура начала потери массы растет на 4-9 °С, у эпоксидных материалов - на 12-23° С, а температура 50% потери массы на 7-16 °С и 14-27 °С, соответственно.

Износостойкость эпоксидных материалов растет при наполнении волластонитом на 36-42 %, а условная прочность при растяжении ПВХ- на 26-35 %

В целом, можно сделать заключение, что модифицирующий эффект волластонита выше в эпоксидных композициях, чем в ПВХ. Это связано с тем, что эпоксидные смолы характеризуются более высокой активностью, чем поливинилхлорид, который имеет относительно инертную структуру, ограниченное количество групп для химического и физического взаимодействия с наполнителем [17].

Это коррелирует с данными работы [18], что в эпоксидных полимерах наполнители выполняют более широкий спектр функций, чем в ПВХ. Кроме того, структура термореактивных полимеров формируется в присутствии наполнителя, в отличие от термопластов, к которым относится ПВХ.

Выводы

Природный и синтетический волластонит являются перспективными наполнителями как эпоксидных, так и поливинилхлоридных материалов. Эти наполнители имеют близкий фазовый состав и кислотно-основные характеристики поверхности и отличаются по пористости, кристалличности и размеру частиц.

Для создания термостойких ПВХ композиций более перспективен природный минерал, а эпоксидных материалов – синтетический силикат кальция. Для роста динамического модуля и температуры стеклования обоих типов полимеров наибольшее модифицирующее действие оказывает волластонит на основе рисовой шелухи.

Большую износостойкость эпоксидных полимеров обеспечивает природный аналог Миволл 10-97, а прочность при растяжении ПВХ – синтезированный силикат кальция.

Оба исследованных наполнителя обеспечивают существенно более высокий модифицирующий эффект в эпоксидных полимерах, по сравнению с поливинилхлоридом, что обусловлено, вероятно, их влиянием на формирование сетчатой структуры.

Список источников

1. Kardo Kh., A., Kalman M., Kinga T. Comparison of different polyvinylchloride (PVC)/calcium carbonate blends and their properties // International Journal of Engineering Research & Science. 2021. Vol. 7. No. 9. P. 16 – 29.
2. Fan-Long J., Xiang L., Soo-Jin P. Synthesis and application of epoxy resins: a review // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015. No. 29. P. 1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
3. Готлиб Е.М., Садыкова Д.Ф., Ямалеева Е.С. Волластонит – эффективный наполнитель резин и композиционных материалов на основе линейных и сетчатых полимеров: монография. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018. 180 с.
4. Орлова Н.А., Коробщикова Т.С. Гранулометрический состав волластонита и его влияние на свойства полимерных композиций // Лакокрасочные материалы и их применение. 2010. № 5. С. 26 – 29.

5. Соколова Ю.А. и др. Синтетический волластонит на основе рисовой шелухи // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2018 г.:* сб. научн. тр. РААСН. Москва: Издательство АСН. 2019. Т. 2. С. 520 – 525. <https://doi.org/10.22337/9785432303134-520-525>
6. Ismail H., Shamsudin R., Abdul Hamid M.A., Jalar A. Synthesis and characterization of nano-wollastonite from rice husk ash and limestone // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 756. P. 43 – 47. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43>
7. McIntyre S., Kaltzakorta I., Liggat J.J., Pethrick R.A., Rhoney I. Influence of the epoxy structure on the physical properties of epoxy resin nanocomposites // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2004. Vol. 44. No. 23. P. 8573 – 8579. <https://doi.org/10.1021/ie048835w>
8. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 10-3. С. 459 – 465. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41858>
9. Jingang Li, Lei Li, Yixin Xiang, Xiang Sixun. Nanostructures epoxy thermosets containing poly(vinylidene fluoride): preparation, morphologies, and dielectric properties // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2016. No. 55(3). P. 586 – 596. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04057>
10. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S.Yu., Park S.J. The Role of Fillers in Improving the Mechanical, Thermal, and Wear Properties of Polymer Composites: A Review // *Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023. Vol. 175. Article 107775. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107775>
11. Крыжановский В.К. и др. Изучение влияния высокодисперсных и наноразмерных неорганических добавок на структурно-физические характеристики эпоксидных матриц и свойства трибопластиков // *Вопросы материаловедения*. 2009. Т. 57. № 1. С. 66 – 76.
12. Готлиб Е.М., Ха Т.Н.Ф., Хасанова А.Р., Галимов Э.Р. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных полимерах природного и синтетического волластонита // *Вестник Томского государственного университета. Химия*. 2019. № 13. С. 13 – 19. <https://doi.org/10.17223/24135542/13/2>
13. Ikram S., Munir A. Mechanical and thermal properties of chemically modified epoxy resin // *Open Journal of Synthesis Theory and Applications*. 2012. No.1. P. 36 – 43. <https://doi.org/10.4236/ojsta.2012.13007>
14. Liu C., He Yu., Sun M., Zhang X., Zhang B., Bai X. Influence of epoxy resin species on the curing behavior and adhesive properties of cyanate ester/poly(aryl ether tri-epoxy) blends // *Polyme*. 2023. Vol. 288. 12 p.
15. Готлиб Е.М., Галимов Э.Р., Валеева А.Р., Кормушин К.В. Эпоксидные композиционные материалы с наполнителями на основе золы рисовой и гречневой шелухи, и металлургических шлаков: Монография. Казань: Изд-во АН РТ. 2023. 168 с.
16. Садькова Д.Ф., Готлиб Е.М., Соколова А.Г. Динамические механические свойства пластифицированных поливинилхлоридных композиций, наполненных силикатами // *Пожаровзрывобезопасность*. 2025. Т. 34. № 3. С. 50 – 58. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.03.50-58>
17. Аликин М.Б., Алексеева К.Д., Панфилов Д.А., Дворко И.М. Лавров Н.А. Свойства эпоксидных композиций, отвержденных продуктами аминолиза вторичного полиэтилен терефталата и поликарбоната // *Механика композитных материалов*. 2022. Т. 58. № 5. С. 697 – 704. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10060-z>
18. Zhang O., Zhang C., Wu L., Sun W., Hu L. Study on morphology and mechanical properties of PVC with ultrafine CaCO₃ surface-modified by acrylate macromolecular modifiers // *Polymers and Polymer Composites*. 2012. Vol. 20 (1-2). P. 191 – 196. <https://doi.org/10.1177/0967391112020001-236>

References

1. Kardo Kh., A., Kalman M., Kinga T. Comparison of different polyvinylchloride (PVC)/calcium carbonate blends and their properties. *International Journal of Engineering Research & Science*. 2021. Vol. 7. No. 9. P. 16 – 29.
2. Fan-Long J., Xiang L., Soo-Jin P. Synthesis and application of epoxy resins: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015. No. 29. P. 1 – 11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
3. Gottlieb E.M., Sadykova D.F., Yamaleeva E.S. Wollastonite – an effective filler for rubbers and composite materials based on linear and cross-linked polymers: monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018. 180 p.
4. Orlova N.A., Korobshchikova T.S. Granulometric composition of wollastonite and its influence on the properties of polymer composites. *Paints and varnishes and their application*. 2010. No. 5. P. 26 – 29.

5. Sokolova Yu.A. et al. Synthetic wollastonite based on rice husk. Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2018: collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Moscow: ASN Publishing House. 2019. T. 2. P. 520 – 525. <https://doi.org/10.22337/9785432303134-520-525>
6. Ismail H., Shamsudin R., Abdul Hamid M.A., Jalar A. Synthesis and characterization of nano-wollastonite from rice husk ash and limestone. Materials Science Forum. 2013. Vol. 756. P. 43 – 47. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.756.43>
7. McIntyre S., Kaltzakorta I., Liggat J.J., Pethrick R.A., Rhoney I. Influence of the epoxy structure on the physical properties of epoxy resin nanocomposites. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2004. Vol. 44. No. 23. P. 8573 – 8579. <https://doi.org/10.1021/ie048835w>
8. Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Fillers for modification of modern polymer composite materials. Fundamental Research. 2017. No. 10-3. P. 459 – 465. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41858>
9. Jingang Li, Lei Li, Yixin Xiang, Xiang Sixun. Nanostructures epoxy thermosets containing poly(vinylidene fluoride): preparation, morphologies, and dielectric properties. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2016. No. 55(3). P. 586 – 596. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04057>
10. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S.Yu., Park S.J. The Role of Fillers in Improving the Mechanical, Thermal, and Wear Properties of Polymer Composites: A Review. Composites – Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023. Vol. 175. Article 107775. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107775>
11. Kryzhanovsky V.K. et al. Study of the influence of highly dispersed and nanosized inorganic additives on the structural and physical characteristics of epoxy matrices and the properties of triboplastics. Voprosy Materialovedeniya. 2009. Vol. 57. No. 1. P. 66 – 76.
12. Gotlib E.M., Kha T.N.F., Khasanova A.R., Galimov E.R. Comparison of the modifying action of natural and synthetic wollastonite in epoxy polymers. Bulletin of Tomsk State University. Chemistry. 2019. No. 13. P. 13 – 19. <https://doi.org/10.17223/24135542/13/2>
13. Ikram S., Munir A. Mechanical and thermal properties of chemically modified epoxy resin. Open Journal of Synthesis Theory and Applications. 2012. No. 1. P. 36 – 43. <https://doi.org/10.4236/ojsta.2012.13007>
14. Liu C., He Yu., Sun M., Zhang X., Zhang B., Bai X. Influence of epoxy resin specialties on the curing behavior and adhesive properties of cyanate ester/poly(aryl ether ni-trile) blends. Polyme. 2023. Vol. 288. 12 p.
15. Gotlib E.M., Galimov E.R., Valeeva A.R., Kormushin K.V. Epoxy composite materials with fillers based on rice and buckwheat husk ash, and metallurgical slags: Monograph. Kazan: Publishing house of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan. 2023. 168 p.
16. Sadykova D.F., Gotlib E.M., Sokolova A.G. Dynamic mechanical properties of plasticized polyvinyl chloride composites filled with silicates. Fire and Explosion Safety. 2025. Vol. 34. No. 3. P. 50 – 58. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.03.50-58>
17. Alikin M.B., Alekseeva K.D., Panfilov D.A., Dvorko I.M., Lavrov N.A. Properties of epoxy composites cured by aminolysis products of secondary polyethylene terephthalate and polycarbonate. Mechanics of composite materials. 2022. Vol. 58. No. 5. P. 697 – 704. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10060-z>
18. Zhang O., Zhang C., Wu L., Sun W., Hu L. Study on morphology and mechanical properties of PVC with ultrafine CaCO₃ surface-modified by acrylate macromolecular modifiers. Polymers and Polymer Composites. 2012. Vol. 20 (1-2). P. 191 – 196. <https://doi.org/10.1177/0967391112020001-236>

Информация об авторах

Соколова А.Г., кандидат технических наук, доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8425-1883>, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, as.falconi@yandex.ru

Готлиб Е.М., доктор технических наук, профессор, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1666-8702>, Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68, egotlib@yandex.ru

© Соколова А.Г., Готлиб Е.М., 2025

Information about the authors

Sokolova A.G., PhD (Engineering), Associate Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8425-1883>, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia, as.falconi@yandex.ru

Gottlieb E.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1666-8702>, Kazan National Research Technological University, 68 Karla Marksa St., Kazan, 420015, Russia, egotlib@yandex.ru

© Sokolova A.G., Gottlieb E.M., 2025