



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 620.22-419.8:678.046

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027

 EDN: MPFQOD

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИЛИКАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКОПАЕМОГО, РАСТИТЕЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Елена Михайловна Готлиб ¹, Екатерина Сергеевна Ямалеева ²,
Алина Равилевна Валеева ³, Илья Дмитриевич Твердов ⁴,
Александр Давидович Поволоцкий ⁵

^{1, 2, 4} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

³ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

⁵ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

¹ egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

² curls888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

³ alina.valeevaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-7863>

⁴ idtverdov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7524-3088>

⁵ adp1956@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение силикатов кальция и магния в качестве наполнителей эпоксидных материалов. Исследуются наполнители, которые получены на основе природного (волластонит марки Миволл 10-97), растительного (золы рисовой шелухи) и техногенного (отхода черной металлургии) сырья.

Исследуемые наполнители повышают твердость на 50–70 %, износостойкость эпоксидных полимеров – на 37 %, прочность при изгибе – до 55 % и адгезию к стали – до 50 %, при этом снижая коэффициент статического трения на 62 %.

В работе также рассматривается зависимость физико-механических свойств эпоксидных материалов от концентрации в них наполнителя. Экспериментально доказано, что оптимальным является соотношение компонентов от 5 до 15 мас. ч. наполнителя на 100 мас. ч. эпоксидиановой смолы.

Наполнитель техногенного происхождения – металлургический шлак в большей степени увеличивает твердость, адгезионную прочность к стали и способствует большему снижению коэффициента статического трения по сравнению с другими изученными наполнителями.

Характер модифицирующего действия силикатных наполнителей практически не зависит от их фазового состава, который влияет только на величину конкретных эксплуатационных показателей.

Ключевые слова: металлургический шлак, рисовая шелуха, волластонит, силикат кальция и магния, коэффициент трения, износостойкость, твердость.

Для цитирования: Антифрикционные эпоксидные материалы, наполненные силикатами на основе ископаемого, растительного и техногенного сырья / Е. М. Готлиб [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 214–223. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/MPFQOD>.

Original article

ANTIFRICTION EPOXY COATINGS FILLED WITH SILICATES BASED ON FOSSIL, VEGETABLE AND TECHNOGENIC ORIGIN RAW MATERIALS

Elena M. Gotlib ¹, Ekaterina S. Yamaleeva ², Alina R. Valeeva ³,
Ilya D. Tverdov ⁴, Alexander D. Povolotskiy ⁵

^{1,2,4} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³ Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

⁵ South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

¹ egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

² curls888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

³ alina.valeevaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-7863>

⁴ idtverdov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7524-3088>

⁵ adp1956@mail.ru

Abstract. The article discusses the use of calcium and magnesium silicates as fillers of epoxy materials. Fillers that are obtained based on natural (wollastonite of the Mivoll 10-97 brand), vegetable (rice husk ash) and manufactured (ferrous metallurgy waste) raw materials are investigated.

The studied fillers increase hardness by 50-70%, wear resistance of epoxy polymers by 37%, bending strength up to 55% and adhesion to steel up to 50%, while reducing the coefficient of static friction by 62%.

The paper also considers the dependence of the physical and mechanical properties of epoxy materials on the concentration of filler in them. It has been experimentally proved that the optimal ratio of components is from 5 to 15 wt. h. of filler per 100 wt.h. of epoxy resin.

The filler of technogenic origin - metallurgical slag increases the hardness, adhesive strength to steel largely and contributes to a greater reduction in the coefficient of static friction compared to other studied fillers.

The nature of the modifying effect of silicate fillers practically does not depend on their phase composition, which affects only the value of specific performance indicators.

Keywords: metallurgical slag, rice husk, wollastonite, diopside calcium silicate, friction coefficient, wear resistance, hardness adhesion.

For citation: Gotlib, E.M., Yamaleeva, E.S., Valeeva, A.R., Tverdov, I.D. & Povolotskiy, A.D. (2024). Antifriiction epoxy coatings filled with silicates based on fossil, vegetable and technogenic origin raw materials. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 214-223. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/MPFQOD>.

ВВЕДЕНИЕ

Графит, дисульфид молибдена и окислы металлов – наиболее широко применяемые наполнители антифрикционных полимерных материалов [1, 2]. Определенный интерес для композиций такого назначения могут представлять кальций магниевые силикаты, например, волластонит и диопсид, содержащие наполнители, имеющие высокую твердость и способные оказывать упрочняющий эффект [3, 4].

В настоящее время разработка месторождений волластонит- и диопсидсодержащих пород в России крайне ограничена. В связи с этим получение синтетических волластонита и диопсида с использованием побочных продуктов растительного и техногенного происхо-

ждения, запасы которых имеются в нашей стране в достаточном количестве, представляют большой практический интерес исходя из экономических и экологических соображений [3, 4].

Одним из видов перспективного сырья для синтеза таких силикатов является рисовая шелуха, которая содержит порядка 18–20% аморфного реакционноспособного диоксида кремния [5, 6] и образуется в больших количествах при переработке зерна в крупу [7, 8].

Другим интересным компонентом для получения силикатов кальция и магния являются отходы производства чугуна, в состав которых входят окислы различных металлов и диоксид кремния [9, 10].

На предприятиях черной металлургии в

России ежегодно образуется около 80 млн. тонн шлаков, а их общее количество, накопленное в отвалах, достигает 500 млн. тонн [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эпоксидные полимеры получали на основе диановой смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), в качестве отвердителя применялся аминоалкилфенол АФ-2 (ТУ 2494-052-00205423-2004) при комнатной температуре в течение 7 суток.

Исследуемые наполнители:

- природный волластонит марки Миволл 10-97 (ПВ, SiO₂ – 50,1 % мас., СаО – 46,8 %) (ТУ 5777-006-40705684-2003);

- синтетический волластонит (СВ), синтезированный при T = 900 °С в течение 3 часов [11, 12] на основе оксидов кальция и кремния, полученных из известняка при 900 °С и из золы рисовой шелухи (ЗРШ, сожженной при 800 °С), при соотношении этих компонентов 1,2:1;

- синтетический диопсид (СД), полученный при T = 1100 °С в течение 3 часов путем спекания ЗРШ, сожженной при 500 °С и доломита при соотношении их 38:57 % мас. (5% мас. – борная кислота, применяемая в качестве плавня для снижения температуры синтеза);

- металлургический шлака (МШ) – продукт переработки шлаков черной металлургии состава, %: СаО – 40, SiO₂ – 37, MgO – 11, Al₂O₃ – 11.

Рентгенографический анализ проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku Smart Lab (И НСОММИ № 44 МС ФГУП «ВИМС» ТПИ 2.44.Ф.1995, Руководство по эксплуатации к рентгеновскому дифрактометру Rigaku Smart Lab).

рН-метрия водных суспензий наполнителей проводилась с помощью комбинированного измерителя марки Seven Multi (ГОСТ 21119.3-91).

Твердость определялась при вдавливании с помощью дюрометра (метод Шора ГОСТ 24621-91).

Адгезионная прочность к стали опреде-

лялась методом отрыва (ГОСТ 32299-2013).

Прочность при изгибе определяли на приборе Градиент-техно (ГОСТ 6806-73).

Жизнеспособность композиций определяли по времени гелеобразования (ГОСТ 27271-2014).

Площадь удельной поверхности по методу БЭТ, объем пор и среднего диаметра пор по методу ВЖН определяли на приборе «Nova 1200e» (ISO 15901-2:2006).

Электронно-микроскопический анализ образцов наполнителей проводили на растровом микроскопе Jeol JSM7001F с использованием для определения элементного состава энергодисперсионного детектора Oxford INCA X-max 80.

Проведение комплексного дифференциального термического анализа (ТГ-ДТГ, ДТА) осуществлялось на синхронном термоанализаторе STA 6000 Perkin Elmer по ГОСТ 33403-2015 в интервале температур 30–600 °С со скоростью нагрева 10 град/мин, в инертной среде азота.

Коэффициент трения определялся на автоматизированной машине трения «Tribometer, CSM Instruments». Линейная скорость при испытании составляла 8,94 см/сек, частота выборки – 10 Гц, температура – 25 °С, влажность – 20 % (ASTM G99–959, DIN50324 и ISO 20808).

Износостойкость определялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1, в качестве контртела использовали бруски из инструментальной стали ХВГ, закаленной до твердости HRC 60–64 (удельное давление контртела на испытываемую поверхность образца P = 1 МПа, скорость скольжения V_{ск} = 1 м/сек, без смазки).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ фазового состава показал, что синтетический и природный силикаты кальция содержат примерно одинаковое количество длинноигльчатого волластонита (табл. 1) и отличаются только типом примесей (псевдоволластонит и ларнит).

Таблица 1 – Фазовый состав силикатных наполнителей, по результатам РКФА

Table 1 – Phase composition of silicate fillers (Q-PXRD spectrum)

Тип наполнителя	Фазовый состав	Содержание, %мас.
ПВ	Волластонит	80
	Псевдоволластонит	20
СВ	Волластонит	75
	Ларнит	25
МШ	Акерманит	81
	Диопсид	19
СД	Диопсид	97
	Тридимит	2
	Кристобалит	1

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИЛИКАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКОПАЕМОГО, РАСТИТЕЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Наполнитель на основе техногенных отходов и ЗРШ и доломита содержат значительно отличающиеся (более чем в 4 раза) количество активного компонента – диопсида и также различный тип примесей: СД – не-

большое количество кристаллического диоксида кремния – тридимита, МШ – преимущественно акерманит – островной меллилит, в состав которого входят оксиды кальция, кремния и магния.

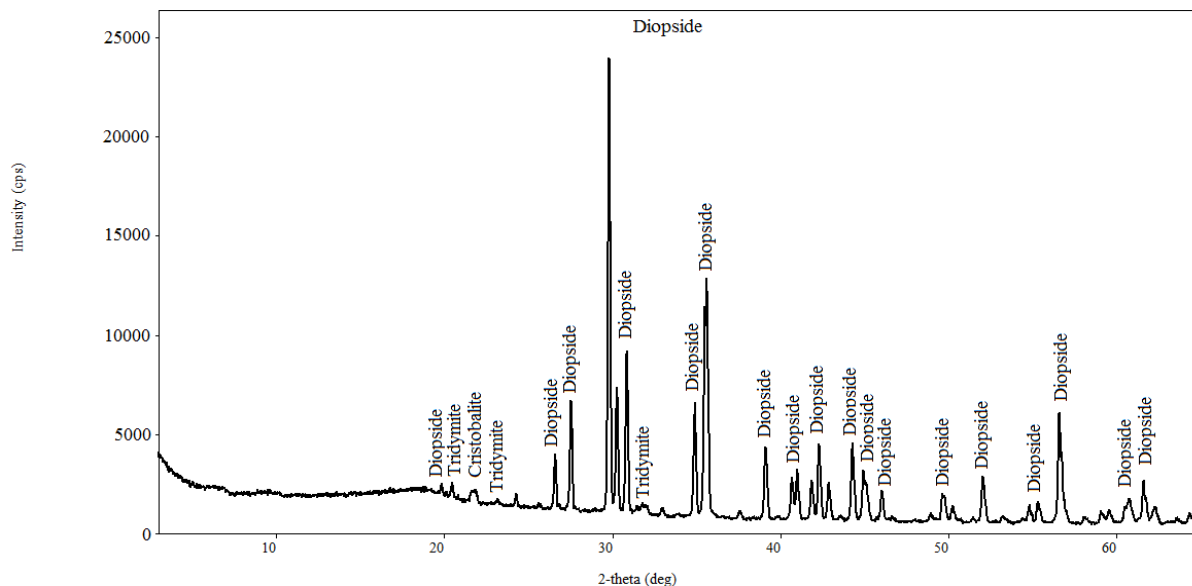


Рисунок 1 – Спектр РКФА диопсида / Figure 1 – Q-PXRD spectrum of diopside

Микроструктура природного волластонита характеризуется наличием щепкообразных кристаллов, пластинок с расщепленными краями и отдельных иголок.

Структура СВ зернистая, пористая и содержит меньше игольчатых частиц, по сравнению с природным силикатом кальция.

Структура МШ не является однородной, имеются кристаллы игольчатой формы и сферообразные частицы разных размеров. Она ближе к структуре синтетического, чем природного волластонита (рис. 2).

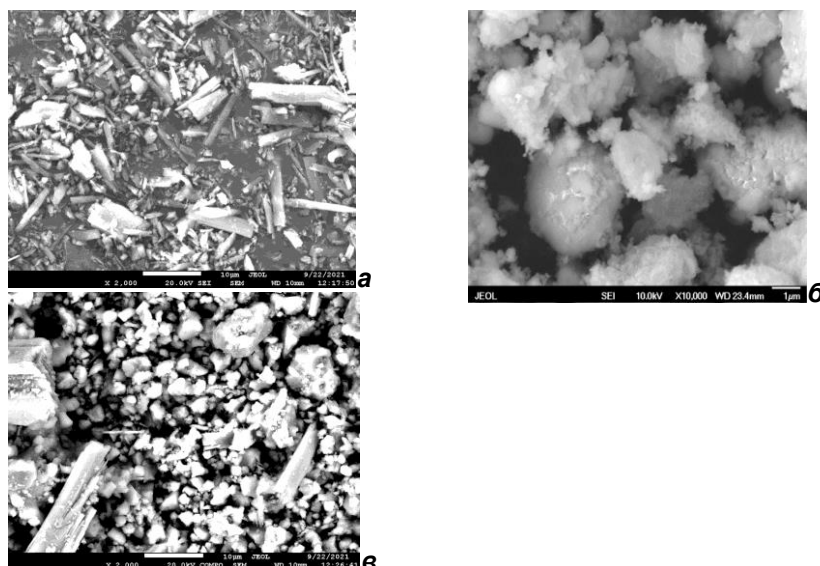


Рисунок 2 – Электронно-микроскопические снимки природного волластонита (а), синтетического волластонита (б) и металлургического шлака (в)

Figure 2 – Electron microscopic images of natural wollastonite (a), synthetic wollastonite (b) and metallurgical slag (c)

Сравнительное исследование модифицирующего действия в эпоксидных композициях образцов силикатных наполнителей, полученных на основе разных видов сырья, показало (табл. 2–4, рис.3), аналогичное изменение физико-механических свойств эпоксидных полимеров.

Все рассматриваемые виды наполнителей повышают твердость эпоксидных композиций.

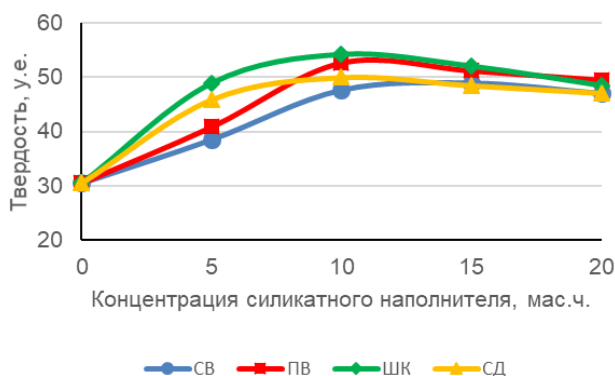


Рисунок 3 – Изменение твердости эпоксидных полимеров в зависимости от концентрации силикатных наполнителей

Figure 3 – Change in the hardness of epoxy polymers depending on the concentration of silicate fillers

Зависимости твердости от концентрации этих добавок носят экстремальный характер с максимумом в области 10–15 мас.ч. наполнителей на 100 мас. ч. эпоксиолигомера (рис. 3). При этом фазовый состав силикатного наполнителя не оказывает значимого влияния на максимальную величину этого показателя. Однако меньший рост твердости обеспечивает наполнение природным волластонитом, а больший – кальций магниевым

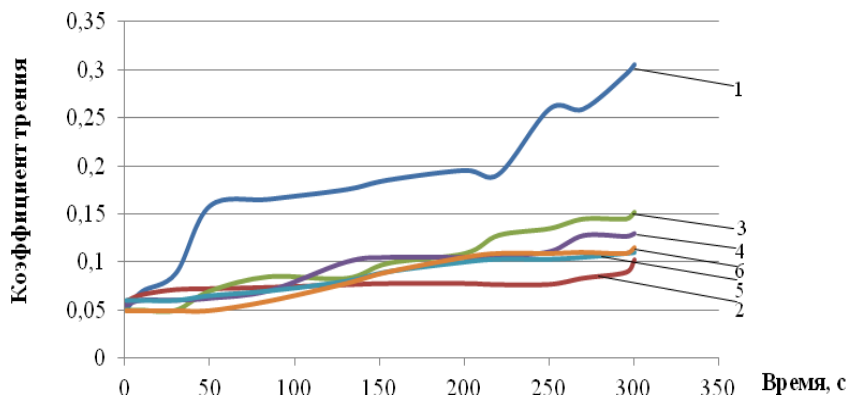


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента статического трения эпоксидных полимеров с различной концентрацией наполнителя (МШ): 1–0; 2–5; 3–10; 4–15; 5–20; 6–25 мас.ч. в зависимости от времени

Figure 5 – Dependence of the coefficient of friction of epoxy polymers with different filler concentrations (MS): 1-0, 2-5, 3-10, 4-15, 5-20, 6-25 wt.h. depending on the time

силикатом на основе отходов производства чугуна.

Износостойкость эпоксидных полимеров снижается с ростом концентрации силикатных наполнителей, полученных на основе сырья техногенного, природного и растительного происхождения во всем исследованном интервале соотношения компонентов (рис. 4, табл. 2).

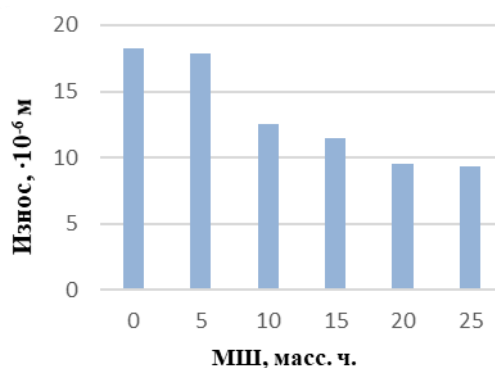


Рисунок 4 – Изменение износостойкости эпоксидных полимеров от концентрации металлургического шлака

Figure 4 – Change in the wear resistance of epoxy polymers from the concentration of metallurgical slag

Повышение износостойкости можно объяснить тем [14], что частицы наполнителя, концентрируясь на поверхности трения, играют роль защитного экрана, локализирующего в своем объеме деформации сдвига и предохраняющие поверхностный слой эпоксидного материала от разрушения. Фазовый состав силикатных наполнителей также не влияет на величину описываемого показателя.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИЛИКАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКОПАЕМОГО, РАСТИТЕЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Коэффициент статического трения эпоксидных покрытий при введении всех рассматриваемых силикатных наполнителей снижается, достигая минимальных значений при содержании их в композиции 5–15 мас. ч. (рис. 5, табл. 2).

Таким образом, при наполнении силикатами кальция и магния имеет место улучшение антифрикционных свойств эпоксидных композиций.

Таблица 2 – Коэффициент трения и износостойкость эпоксидных полимеров с силикатными наполнителями*

Table 2 – Coefficient of friction and wear resistance of epoxy polymers with silicate fillers

Трибологические свойства	Наполнитель				
	Без наполнителя	СВ	МШ	ПВ	СД
Коэф. трения	0,39	0,21	0,13	0,23	0,19
Износ, 10 ⁻⁶ м	18,2	11,3	11,5	11,7	11,3

*концентрация силикатного наполнителя: 15 мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидиановой смолы (ЭД-20)

Это можно связать, вероятно, с большим содержанием оксидов магния в их составе, которые обладают более высокой теплопроводностью, чем диоксид кремния, т.е. способны более эффективно отводить тепло от зоны трения [15].

Положительное действие окислов металлов на антифрикционные свойства объясняют [16] также образованием на трущихся поверхностях соединений с высокой износостойкостью.

Адгезионная прочность при отрыве к стали и прочность при изгибе экстремально зави-

В то же время диоксидсодержащие наполнители на основе растительного (СД) и техногенного сырья (МШ) обеспечивают лучшие трибологические характеристики как по сравнению с применением Миволл 10-97, так и синтетического волластонита на основе золы рисовой шелухи (табл. 2).

сят от содержания в эпоксидных композициях всех исследованных образцов силикатов кальция и магния. Наибольшие значения этих показателей наблюдаются при оптимальном содержании силикатных наполнителей 10–15 мас.ч.

Адгезионная прочность покрытий в большей степени увеличивается при применении наполнителя, получаемого переработкой металлургического шлака, по сравнению с силикатами кальция и магния на основе золы рисовой шелухи и ПВ (табл. 3).

Таблица 3 – Адгезионная прочность при отрыве и прочность при изгибе эпоксидных покрытий, наполненных силикатами кальция на основе разных видов сырья*

Table 3 – Adhesive tear strength and bending strength of epoxy coatings filled with calcium silicates based on different types of raw materials

Прочностные характеристики	Наполнитель				
	Без наполнителя	СВ	МШ	ПВ	СД
Прочность при изгибе, МПа	64,5	101,0	99,1	91,2	97,6
Прочность при отрыве (адгезия к стали), МПа	3,1	3,4	4,7	3,5	3,5

*концентрация силикатного наполнителя: 10 мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидиановой смолы (ЭД-20)

Анализ экспериментальных данных показал, что прочность при изгибе у наполненных силикатами кальция и магния эпоксидных материалов также значительно выше, чем у ненаполненных, и растет немного больше в случае введения в их рецептуру силикатного наполнителя на основе сырья техногенного происхождения (МШ) и СВ, полученного с применением золы рисовой шелухи (табл. 3, рис. 6).

Все исследованные силикаты кальция и магния изменяют жизнеспособность (табл. 4) эпоксидных композиций. Это связано с влияни-

ем наполнителей на формирование пространственной структуры эпоксидных полимеров [17, 18] за счет селективного взаимодействия наполнителя с компонентами связующего в процессе отверждения. При этом вследствие избирательной адсорбции вблизи поверхности наполнителя может образоваться граничный слой с избытком или недостатком отвердителя. В зависимости от этого силикатный наполнитель может либо замедлять, либо ускорять реакцию отверждения. Так, применение волластонит и диоксидсодержащих наполнителей на

основе природного и растительного сырья оказывает ингибирующий эффект, а металлургического шлака – каталитический (рис. 7)

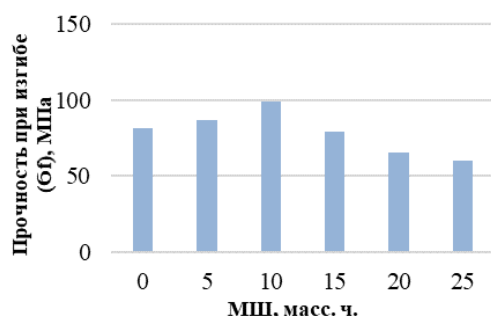


Рисунок 6 – Зависимость прочности на изгиб эпоксидных полимеров от концентрации металлургического шлака

Figure 6 – Dependence of the flexural strength of epoxy polymer on the concentration of metallurgical slag

Возможно, это связано с тем, что МШ имеет самую меньшую пористость из всех исследованных силикатов (табл. 4), что должно влиять на характер межфазного взаимодействия.

Таблица 4 – Характеристики пористости wollastonite- и диопсидсодержащих наполнителей

Table 4 – Porosity characteristics of wollastonite and diopside-containing fillers

Тип наполнителя	Удельная поверхность пор, м ² /г	Общий объем пор, см ³ /г	Средний диаметр пор, нм
ПВ	3,868	0,017	3,491
СВ	17,895	0,081	4,120
МШ	0,475	–	–
СД	0,614	0,001	4,113

Изученные силикатные наполнители имеют щелочную природу поверхности (табл. 5). Меньшее значение pH водных дисперсий имеет синтетический диопсид (СД). По-видимому, это связано с тем, что, при его получении применяется борная кислота, в качестве плавня для снижения температуры силикатообразования [19]. Это тоже может внести определенный вклад в характер межфазных взаимодействий.

Общая потеря массы эпоксидных материалов уменьшается при наполнении металлургическим шлаком по сравнению с базовым составом. При этом термостабильность экстремально зависит от содержания этого наполнителя. Она достигает максимума при 5–10 масс. ч. МШ на 100 масс. ч. эпоксидного полимера, а затем снижается (рис. 8).

имодействия. Определенный вклад может вносить и гранулометрический состав наполнителя, то есть удельная поверхность его частиц, определяющая протяженность межфазной границы.

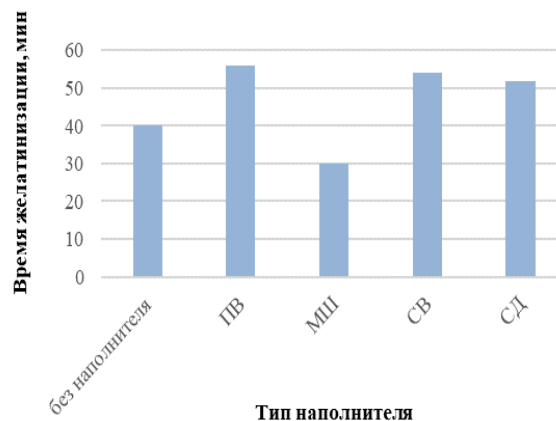


Рисунок 7 – Время желатинизации эпоксидных композиций

Figure 7 – Working life of epoxy compositions

Таблица 5 – Кислотно-основные характеристики поверхности силикатов кальция

Table 5 – Acid-base properties of calcium silicate surface

Тип наполнителя	pH водной суспензии при 20 °С
МШ	10,5
СВ	11,8
ПВ	10,7
СД	9,1

На рисунке 8 наблюдается определенный термостабилизирующий эффект при применении этого кальций-магниевого силиката.

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИЛИКАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКОПАЕМОГО, РАСТИТЕЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

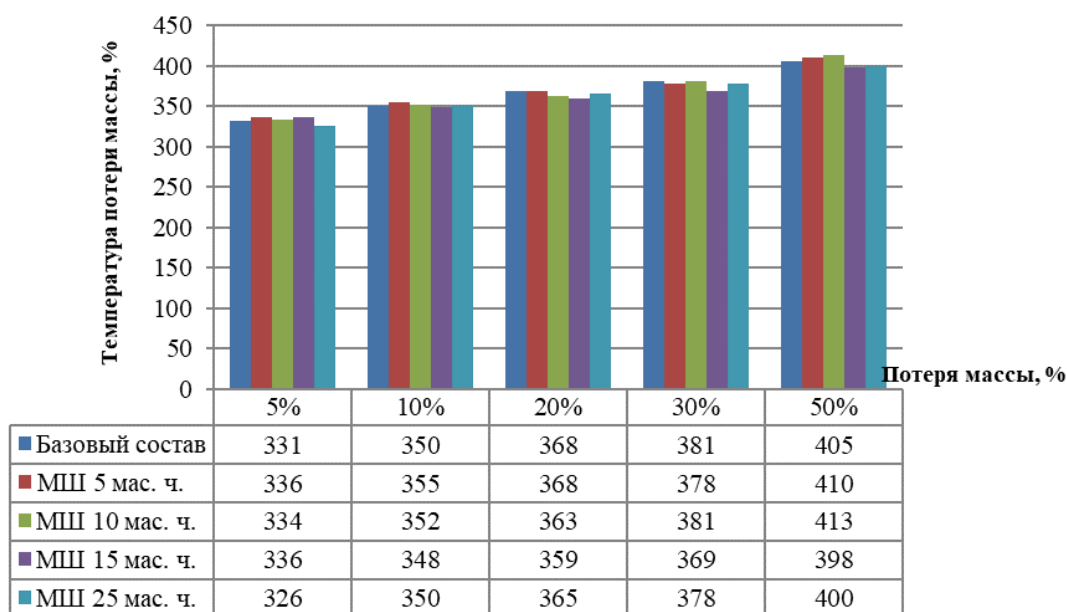


Рисунок 8 – Термостабильность эпоксидных материалов в зависимости от концентрации металлургического шлака

Figure 8 – Thermal stability of epoxy materials, depending on the concentration of metallurgical slag

Таблица 6 – Температуры начала ($T_{нач}$) и 50 % потери массы ($T_{50\%}$) наполненных эпоксидных полимеров*

Table 6 – Starting temperatures ($T_{нач}$) and 50% mass loss ($T_{50\%}$) of filled epoxy polymers

Тип наполнителя	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{50\%}, ^\circ\text{C}$
Без наполнителя	331	405
ПВ	340	415
СВ	350	420
МШ	334	413

*концентрация силикатного наполнителя: 10 мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидиановой смолы (ЭД-20)

Термостабильность эпоксидных материалов с wollastonitсодержащими наполнителями несколько выше, чем с диоксид содержащими (рис. 9). Возможно, это связано с наличием у них большей доли частиц, имеющих игольчатую форму (рис. 2), обеспечивающую микроармирующий эффект наполнителя.

Таким образом, все исследованные силикаты кальция и магния являются эффективными наполнителями эпоксидных полимеров, повышающими их твердость, износостойкость, термостабильность, адгезионные и прочностные свойства и снижающими коэффициент трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные наполнители эпоксидных полимеров – силикаты кальция и магния на ос-

нове природного, растительного и техногенного сырья эффективны для получения износостойких антифрикционных покрытий с высоким уровнем твердости, адгезионных и прочностных характеристик, повышенной термостабильностью. При этом характер модифицирующего действия силикатных наполнителей практически не зависит от их фазового состава, который влияет только на величину конкретных эксплуатационных показателей.

Различное влияние исследованные наполнители оказывают только на жизнеспособность наполненных ими композиций, что связано с особенностями силикатообразования при изотермической выдержке отходов производства чугуна.

В зависимости от областей конкретного практического применения можно рекомендовать использование того или иного силиката. Так, для создания антифрикционных эпоксидных покрытий и клеевых составов более перспективно применение наполнителя на основе техногенного сырья. В тоже время композиции, наполненные продуктом переработки металлургического шлака, являются менее технологичными из-за меньшей жизнеспособности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ciullo P.A., Robinson S. Wollastonite – versatile functional filler // Paint and Coatings Industry. 2009. № 11. P. 50.

2. Biomineralization, antibacterial activity and mechanical properties of biowaste derived diopside nanopowders / R Choudhary [et al.] // *Adv Powder Technol.* 2019. № 30. P. 1950–1964.

3. Получение и применение синтетического волластонита из природного и техногенного сырья / В.Д. Гладун [и др.] // *Химическая технология.* 2004. № 9. С. 4–11.

4. Islamova G.G., Lygina T.Z., Gubajdullina A.M. Researches of kinetics and mechanism of solid-phase synthesis of calcium silicates // XVII International Conference Thermodynamics in Russia. Kazan, 2009. P. 391.

5. Пути утилизации побочных продуктов при получении диоксида кремния из рисовой шелухи / Е.М. Готлиб [и др.] // *Бутлеровские сообщения.* 2020. Т. 62. № 5. С. 72–77. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-5-72.

6. Влияние наполнителей, полученных на основе отходов переработки зерна, на химическую стойкость эпоксидных материалов / Е.М. Готлиб [и др.] // *Ползуновский вестник.* 2022. № 3. С. 222–229.

7. Sarangi M., Bhattacharyya S., Beher R.C. Effect of temperature on morphology and phase transformations of nanocrystalline silica obtained from rice husk // *Phase Transitions: A Multinational Journal.* 2009. Vol. 82. № 5. P. 377–386.

8. Agricultural By-Products as Advanced Raw Materials for Obtaining Modifiers and Fillers for Epoxy Materials / E. Gotlib [et al.] // *Key Engineering Materials.* 2019. Vol. 822. P. 343–349.

9. Русина В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов : учеб. пособие. Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. 224 с.

10. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства : монография / О.Ю. Шешуков [и др]. Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2017. 208 с.

11. Готлиб Е.М., Ха Т.Н.Ф. Получение синтетического волластонита на основе рисовой шелухи // *Вестник технологического университета.* 2019. Т. 22. № 7. С. 42–46.

12. Исследование природного отечественного сырья для получения силикатных наполнителей / Е.М. Готлиб [и др.] // *Южно-Сибирский научный вестник.* 2022. Т. 43. № 3. С. 67–73.

13. Кочергин Ю.С., Золотарева В.В., Григоренко Т.И. Износостойкость композиционных материалов на основе эпоксидно-каучуковых полимеров // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2017. № 4. С. 10–19.

14. Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Васильев А.П. Исследование влияния оксида алюминия на структуру и свойства ПТФЭ // *Фундаментальные исследования.* 2014. № 12. С. 2557–2562.

15. Мостовой А.С., Нуртазина А.С., Кадыкова Ю.А. Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями // *Вестник ВГУИТ.* 2018. Т. 80. № 3. С. 330–335. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-330.

16. Dangsheng X. Friction and wear properties of UHMWPE composites reinforced with carbon fiber

// *Materials Letters.* 2005. Vol. 59, Issue 2–3. P. 175–179.

17. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных полимерах природного и синтетического волластонита / Е.М. Готлиб [и др.] // *Вестник Томского государственного университета. Химия.* 2019. № 13. С. 13–19.

18. Изучение влияния высокодисперсных и наноразмерных неорганических добавок на структурно-физические характеристики эпоксидных матриц и свойства триболопластиков / В.К. Крыжановский [и др.] // *Вопросы материаловедения.* 2009. Т. 57. № 1. С. 66–76.

19. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Модификация керамических составов сырьевыми материалами Сибирского региона // *Вестник Евразийской науки.* 2020. № 4. С. 18–26.

Информация об авторах

Е. М. Готлиб – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Технологии синтетического каучука Казанского национального исследовательского технологического университета.

Е. С. Ямалеева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Медицинской инженерии, Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. Р. Валеева – ассистент кафедры Материаловедения, сварки и производственной безопасности, аспирант 2-го курса кафедры Материаловедения, сварки и производственной безопасности, Казанского национального исследовательского технологического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

И. Д. Твердов – инженер 1 категории, Комплексная лаборатория «Наноаналитика», Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. Д. Поволоцкий – кандидат технических наук, директор центра – Научно-образовательный центр «Металлургия» Южно-Уральского государственного университета.

REFERENCES

1. Ciullo, P.A., Robinson, S. (2009). Wollastonite - versatile functional filler. *Paint and Coatings Industry*, (11), 50.

2. Choudhary, R., Venkatraman, S.K., Chatterjee, A. (2019). Biomineralization, antibacterial activity and mechanical properties of biowaste derived diopside nanopowders. *Adv Powder Technol.* (30), 1950–1964.

3. Gladun, V.D., Akat'eva, L.V., Andreeva, N.N., Hol'kin, A.I. (2004). Obtaining and application of synthetic wollastonite from naturally occurring and man-made raw materials. *Chemical Technology*, (9), 4–11. (In Russ.).

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2024

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИЛИКАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКОПАЕМОГО, РАСТИТЕЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

4. Islamova, G.G., Lygina, T.Z., Gubajdullina, A.M. / Researches of kinetics and mechanism of solid-phase synthesis of calcium silicates. *XVII International Conference Thermodynamics in Russia*. Kazan. (In Russ.).
5. Gotlib, E.M., Ha, T.N.P., Shil'nikova, N.V. (2020). The ways of utilizing by-products at obtaining silicon dioxide from rice husk. *Butlerov's notes*, (5), 72-77. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-62-5-72. (In Russ.).
6. Gotlib, E.M., Yamaleeva, E.S., Valeeva, A.R., Gimranova, A.R., Ncumu, R.S. (2022). Influence of fillers obtained on the basis of grain processing wastes on the chemical resistance of epoxy materials. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 222-229. (In Russ.).
7. Sarangi, M., Bhattacharyya, S., Beher, R.C. (2009). Effect of temperature on morphology and phase transformations of nanocrystalline silica obtained from rice husk. *Phase Transitions: A Multinational Journal*, (5), 377-386.
8. Gotlib, E.M., Ha, T.N.F., Nguyen, T.L.A., Sokolova, A.G., Yamaleeva, E.S., Musin, I.N. (2019). Agricultural By-Products as Advanced Raw Materials for Obtaining Modifiers and Fillers for Epoxy Materials. *Key Engineering Materials*, (822), 343-349. (In Russ.).
9. Rusina, V.V. (2007). *Mineral binders on the base of large-tonnage industrial wastes: educational resource*. Bratsk: GOU VPO "Bratsk State University". (In Russ.).
10. Sheshukov, O.Y., Miheenkov, M.A., Nekrasov, I.V., Egiazar'yan, D.K., Metelkin, A.A., Shevchenko, O.I. (2017). *The issues of utilizing refinery slags of steelmaking industry: monograph*; Nizhniy Taghil: HTI (branch) UrFU. (In Russ.).
11. Gotlib, E.M., Ha, T.N.P. (2019). Obtaining of synthetic wollastonite on the base of rice husk. *Bulletin of Technological university*, (7), 42-46. (In Russ.).
12. Mishagin, K.A., Tverdov, I.D., Gotlib, E.M., Yamaleeva, E.S., Khacrinov, A.I. (2022). Study of natural domestic raw materials for obtaining silicate fillers. *South-siberian scientific bulletin*, (3), 67-73. (In Russ.).
13. Kochergin, Yu.S., Zolotareva, V.V., Grigorenko, T.I. (2017). Abrasion resistance of composite materials on the base of epoxy-resin polymers. *Bulletin of Belgorod State Technic University by Shukhov*, (4), 10-19. (In Russ.).
14. Okhlopkova, A.A., Struchkova, T.S., Vailyev, A.P. (2014). The study of the impact of aluminum oxide on the structure and properties of PTPhE. *Fundamental Research*. (12), 2557-2562. (In Russ.).
15. Mostovoj, A.S., Nurtazina, A.S., Kadykova, YU.A. (2018). Epoxy composites with enhanced performance, filled with dispersed mineral fillers. *Bulletin of VSUIT*, (3), 330-335. (In Russ.).
16. Dangsheng, X. (2005). Friction and wear properties of UHMWPE composites reinforced with carbon fiber *Materials Letters*. (2-3), 175-179.
17. Gotlib, E.M., Ha, T.N.P., Hasanova, A.R., Galimov, E.R. (2019). Comparison of modifying effect of natural and synthetic wollastonite in epoxy polymers. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*, (13), 13-19. (In Russ.).
18. Kryzhanovsky, V.K. (2009). The study of impact of highly disperse and nanosized nonorganic additives on structural physical characteristics of epoxy matrices and properties of triboplastics. *The issues of Material science*, (1), 66-76. (In Russ.).
19. Men'shikova, V.K., Demina, L.N. (2020). Modification of ceramic compositions with raw materials of the Siberian region, *Bulletin of the Eurasian Science*, (4), 18-26. (In Russ.).

Information about the authors

E.M. Gotlib - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology, Kazan National Research Technological University.

E.S. Yamaleeva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Medical Engineering, Kazan National Research Technological University.

A.R. Valeeva - Assistant of the Department of Materials Science, Welding and Industrial Safety, 1st year postgraduate student of the Department of Materials Science, Welding and Industrial Safety, Kazan National Research Technological University named after A.N. Tupolev - KAI.

I.D. Tverdov - engineer of the 1st category, Nanoanalytics Complex Laboratory, Kazan National Research Technological University.

A.D. Povolotskiy - Candidate of Technical Sciences, director of the center - Scientific and educational center "Metallurgy" of the South Ural State University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 15 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 15 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.