

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>

Состав и физико-механические свойства термореактивных стеклопластиков

А. В. Кузько¹ ✉, А. Е. Кузько¹, А. П. Кузьменко¹
Н. Е. Корниенко¹, Е. А. Новиков¹, М. О. Зубарева¹

¹ Юго-Западный государственный университет
50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: avkuzko@mail.ru

Резюме

Цель. Разработка методики анализа состава сырья стеклопластика с помощью наноаналитического оборудования, исследование его компонент и их сопоставление с физико-механическими свойствами готовых (полимеризованных) изделий для прогнозирования качества продукции. Определение атомного и частично молекулярного состава образцов. Установление процентного соотношения полимерной матрицы и наполнителей. Определение среднего диаметра и длины фибры стекловолокна в различных образцах.

Методы. Измерение среднего диаметра стекловолокна в различных образцах производилось на сканирующем электронном микроскопе JEOL 6610LV Регионального центра нанотехнологий ЮЗГУ. Атомный состав премиксов определен на ЭДС-приставке Oxford для электронного микроскопа. Для изучения молекулярного состава был выбран ИК-Фурье-спектрометр. Процентное соотношение полимерной матрицы и наполнителей установлено с помощью термогравиметрического анализа. Измерение средней длины фибры стекловолокна проводилось посредством обработки изображений в программной среде Gwyddion.

Результаты. С помощью наноаналитического оборудования получены параметры композитных материалов ВМС: состав и процентное содержание полимерной матрицы, а также ее наполнителей, форма и размеры наполнителей, исследовано влияние отношения длины к диаметру фибры армирующего волокна на прочность на изгиб пластмассового изделия.

Заключение. Создана методика определения состава премикса стеклопластика, определено влияние процентного соотношения компонент, размера и формы наполнителей на прочностные свойства для проверки качества входного сырья и прогнозирования свойств изделий из него.

Ключевые слова: полимерный композит; термореактивный материал; стеклопластик; премикс; связующее; армирующее волокно.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (г/з 2020 № 0851-2020-0035) и в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Состав и физико-механические свойства термореактивных стеклопластиков / А. В. Кузько, А. Е. Кузько, А. П. Кузьменко, Н. Е. Корниенко, Е. А. Новиков, М. О. Зубарева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 105–117. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>

Поступила в редакцию 28.06.2022

Подписана в печать 17.08.2022

Опубликована 28.09.2022

© Кузько А. В., Кузько А. Е., Кузьменко А. П., Корниенко Н. Е., Новиков Е. А., Зубарева М. О., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2022; 12(3): 105–117

Composition and Physico-Mechanical Properties of Thermosetting Fiberglass

Anna V. Kuzko¹ ✉, Andrey E. Kuzko¹, Alexander P. Kuzmenko¹,
Nikita E. Kornienko¹, Evgeny A. Novikov¹, Maria O. Zubareva¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: pribylovaleksandr99@mail.ru

Abstract

The purpose of the work. Development of a method for analyzing the composition of fiberglass raw materials using nanoanalytical equipment, studying its components and comparing them with the physical and mechanical properties of finished (polymerized) products to predict product quality. Determination of the atomic and partially molecular composition of samples. Establishment of the percentage ratio of the polymer matrix and fillers. Determination of the average diameter and length of a fiberglass fiber in various samples. Comparison of the physical and mechanical properties of prototypes and the data obtained on their composition.

Methods. Measurement of the average diameter of glass fiber in various samples was carried out using a JEOL 6610LV scanning electron microscope of the Regional Nanotechnology Center of SWSU. The atomic composition of the pre-mixes was determined on an Oxford EMF attachment for an electron microscope. An IR Fourier spectrometer was chosen to study the molecular composition. The percentage ratio of the polymer matrix and fillers was determined using thermogravimetric analysis. The measurement of the average length of a fiberglass fiber was carried out by means of image processing in the Gwyddion software environment.

Results. With the help of nanoanalytical equipment, the parameters of IUD composite materials were obtained: the composition and percentage of the polymer matrix, as well as its fillers, the shape and size of the fillers, and the effect of the length-to-diameter ratio of a reinforcing fiber fiber on the bending strength of a plastic product was studied.

Conclusion. A method for determining the composition of the fiberglass premix has been created, the influence of the percentage ratio of the components, the size and shape of fillers on the strength properties has been determined to check the quality of the input raw material and predict the properties of products from it.

Keywords: polymer composite; thermosetting material; fiberglass; premix; binder; reinforcing fiber.

Funding: The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (g/z 2020 No. 0851-2020-0035) and within the framework of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuzko A. V., Kuzko A. E., Kuzmenko A. P., Kornienko N. E., Novikov E. A., Zubareva M. O. Composition and Physico-Mechanical Properties of Thermosetting Fiberglass. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(3): 105–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-105-117>

Received 28.06.2022

Accepted 17.08.2022

Published 28.09.2022

Введение

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, диэлектрическим и термостойким

свойствам традиционные [1–3]. К числу наиболее перспективных относятся полимерные композиционные материалы, в частности стеклопластики, которые во всем мире известны под названием Bulk

Molding Compound (ВМС), использующиеся благодаря хорошим механическим и электроизоляционным свойствам в качестве корпусов изделий электротехнической промышленности, автомобилестроении [4, 5] и ракетостроении [6]. Каждый подобный материал состоит из множества различных компонент, которые в разной степени влияют на свойства изделий, изготовленных из него [7–10]. Исследование состава и характеристик данных полимерных композитов является актуальной задачей. Понимание того, какие вещества и в каком соотношении используются при производстве пресс-материалов, позволит производителям разрабатывать собственные рецептуры премиксов, которые будут обладать улучшенными свойствами [11–13]. Современное аналитическое оборудование, такое как инфракрасный Фурье-спектрометр, сканирующий электронный микроскоп, позволяет проводить исследования и анализ различных

композитных материалов. Подобные исследования позволят получать изделия и новые пресс-материалы самого разного назначения, удовлетворяющие всё более возрастающим требованиям новой техники в различных отраслях промышленности [14–16].

Материалы и методы

Для проведения исследования были выбраны два премикса со схожими механическими свойствами отечественного и импортного производства: Formix ВМС (Гусь-Хрустальный, Россия) и Tetratur F4206 (Германия). *Дополнительно параллельно выполнялся анализ импортного образца Tetratur F4308 (Германия), изделия из которого обладают улучшенными характеристиками (прочность на изгиб, прочность при ударе и огнестойкость).* В таблице 1 приведены наиболее важные физико-механические свойства из сопроводительной технической документации отобранных премиксов.

Таблица 1. Свойства отобранных премиксов стеклопластиков

Table 1. Properties of selected fiberglass premixes

Физические свойства	Наименование материала ВМС		
	Formix ВМС	Tetratur F4206	Tetratur F4308
Плотность, г/см ³	1,95	1,8...1,9	1,6–1,8
Теплостойкость, °С	200	> 220	> 240
Прочность на изгиб, МПа	80...90	120...130	150...170
Модуль упругости при изгибе, ГПа	100	120	120...125
Прочность при ударе, кДж/м ²	15	20	30
Огнестойкость, категория	НВ/2.5	V0/2.5	V0/3.2
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴
Удельное поверхностное сопротивление, Ом	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³

Из таблицы 1 видно, что образцы имеют схожие значения плотности, объемного и поверхностного сопротивлений, но различаются механическими характеристиками: прочностью на изгиб и прочностью при ударе. Отобранные премиксы стеклопластика (международное название Bulk Molding Compound) состоят из полимерной матрицы (ненасыщенные полиэфирные смолы), армирующей фибры стекловолокна и порошковых наполнителей. Исследования проведены по следующим этапам: инфракрасная спектроскопия (ИК) премиксов для определения их молекулярного состава (Nicolet iS50, спектральное разрешение $0,125 \text{ см}^{-1}$) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, JEOL 6610LV, 3 нм) для измерений диаметра стекловолокон трех указанных образцов. Проведение энергодисперсионного анализа (ЭДА) для определения атомного состава порошкового наполнителя с помощью детектора микрорентгеноспектрального анализа (X-Max Silicon Drift Detector фирмы Oxford Instruments, 0,1% по элементам, начиная с углерода), встроенного в СЭМ (премикс ВМС – это диэлектрик, который заряжается при бомбардировке электронами, поэтому при пробоподготовке его поверхность покрывалась магнетронной нанопленкой из Pt, что наряду с использованием крепления углеродным скот-

чем на алюминиевом держателе обеспечивало как отвод заряда, так и снижение нагрева за счет джоулевых токов), анализ (ГОСТ 29127-91 (ИСО 7111-87)) изменений массового содержания органической матрицы по измерениям потерь веса при нагревании (муфельная печь, керамический тигль, $T = 800^\circ\text{C}$, по 30 минут), измерения длины фибры с помощью обработки изображений в программной среде Gwyddion.

Результаты и их обсуждение

Основным вопросом, решаемым в данном исследовании, является объяснение различия в прочности на изгиб, исходя из состава премиксов и размеров армирующих наполнителей, ответ на который дают приведенные ниже результаты.

Результаты исследования с помощью ИК-спектроскопии представлены на рисунке 1.

Три пика валентных колебаний функциональных групп, наблюдаемых во всех трех образцах при волновых числах 1742 см^{-1} $\nu(\text{C}=\text{O})$, 1160 см^{-1} $\nu(\text{C}-\text{O})$, 1030 см^{-1} $\nu(\text{C}-\text{O})$ характерны для алифатических эфиров [17; 18].

Наличие в образцах спиртов (в частности, фенолов) соответствуют пики при 1241 см^{-1} $\nu(\text{C}-\text{O})$, 3400 см^{-1} $\nu(-\text{OH})$ валентных колебаний и 1300 см^{-1} , 650 см^{-1} $(-\text{OH})$ деформационных колебаний [19].

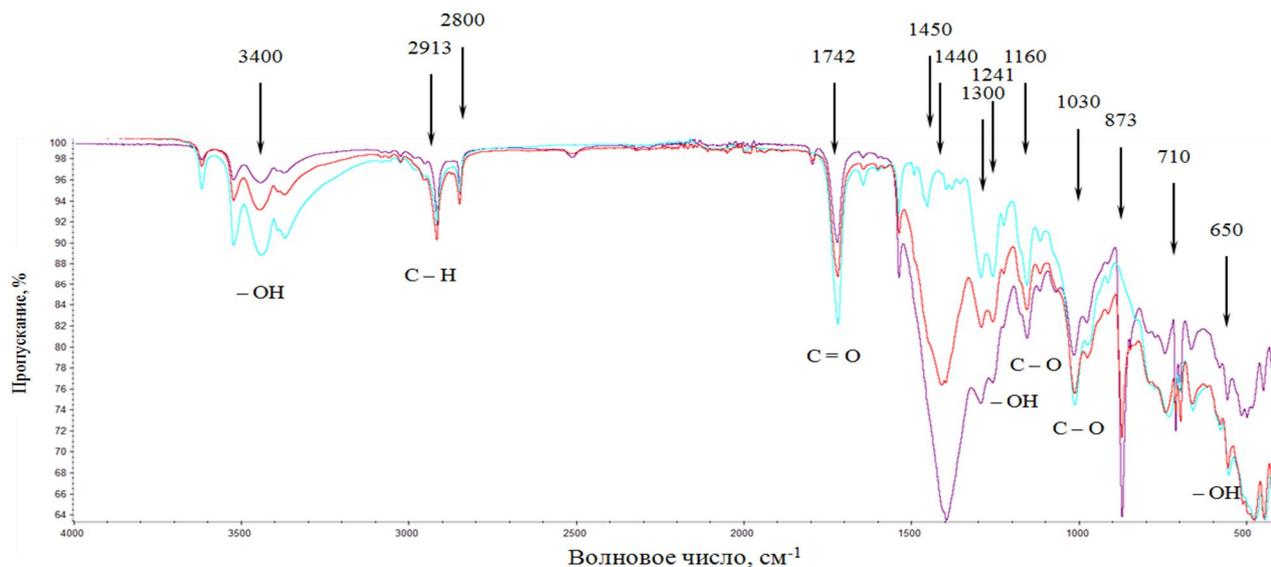


Рис. 1. ИК-спектры исследуемых образцов

Fig. 1. FTIR-spectra of the studied samples

Результаты измерений показывают, в спектрах образцов Formix BMC и Tetradur F4206 присутствуют пики поглощения, соответствующие волновым числам 1440 см^{-1} , 873 см^{-1} , 710 см^{-1} , что можно интерпретировать как наличие в этих образцах карбонатной функциональной группы CO_3 [20], причем пики

Formix BMC имеют большую интенсивность, что позволяет выдвинуть предположение, что в этом образце больше, чем в других, содержится порошкового наполнителя – мела.

Результаты энергодисперсионного анализа для определения атомного состава образцов для наглядности сравнения сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты ЭДС-анализа

Table 2. Results of EMF analysis

Элемент	Образец			Название эталона
	Formix BMC	Tetradur F4206	Tetradur F4308	
	вес. %			
C	38,33	43,69	40,51	C Vit
O	39,62	36,72	40,08	SiO ₂
Mg	0,35	0,29	0,22	MgO
Al	3,03	4,70	12,89	Al ₂ O ₃
Si	2,88	3,85	2,59	SiO ₂
S	0,31	0,35	0,46	FeS ₂
Ca	14,32	9,38	2,06	Wollastonite
Zn	1,16	1,01	1,20	Zn

По данным ИК-Фурье-спектро-скопии образцы Tetradur F4206 и Formix ВМС являются практически идентичными. Однако ЭДС-анализ показал, что в образце Formix ВМС повышенное процентное содержание Са, что свидетельствует, что в нем больше порошка мела, чем в других образцах. Содержание Mg говорит о присутствии разнообразных добавок на основе магния (например, $Mg(OH)_2$, которая способствует адгезии связующего на волокне). Из таблицы 2 видно, что алюминий выявлен во всех образцах, что указывает на наличие антипирена ($Al(OH)_3$), но в образце Tetradur F4308 содержание Al повышенное, а Са – пониженное, что свидетельствует, что в качестве порошкового наполнителя используется не кальцит, а, предположительно, оксид алюминия Al_2O_3 , улучшающий физико-механические характеристики премикса. Элемент Zn указывает на наличие во всех образцах соединений цинка (например, ZnO , использующийся в качестве катализатора). Анализ снимков распределения элементов (рис. 2–4) на поверхностях пресс-материалов говорит о его равномерности, что положительно влияет на качество продукции.

Результаты изменений массового содержания органической матрицы по измерениям потерь веса

При подсчете массы, которая была потеряна в процессе сжигания, содержание неорганической части составило:

- 1) для образца Formix ВМС – 69,9%, после повторного сжигания – 69,7%;
- 2) для образца Tetradur F4206 – 61,4%, после повторного сжигания – 60,9%
- 3) для образца Tetradur F4308 – 62,1%, после повторного сжигания – 61,8%

По результатам сжигания можно сказать, что образец Formix ВМС имеет наибольшую степень наполнения и, соответственно, наименьшее процентное содержание полимерной матрицы.

Исследования геометрических параметров армирующего наполнителя (диаметра и длины) осуществлялись по результатам анализа изображений поверхности образцов, полученных на сканирующем электронном микроскопе с отмеченными диаметрами армирующих волокон (рис. 2–4). Были определены средние диаметры фибры для каждого образца: для образца Formix ВМС – 18 мкм, Tetradur F4206 – 15 мкм, Tetradur F4308 – 20 мкм соответственно.

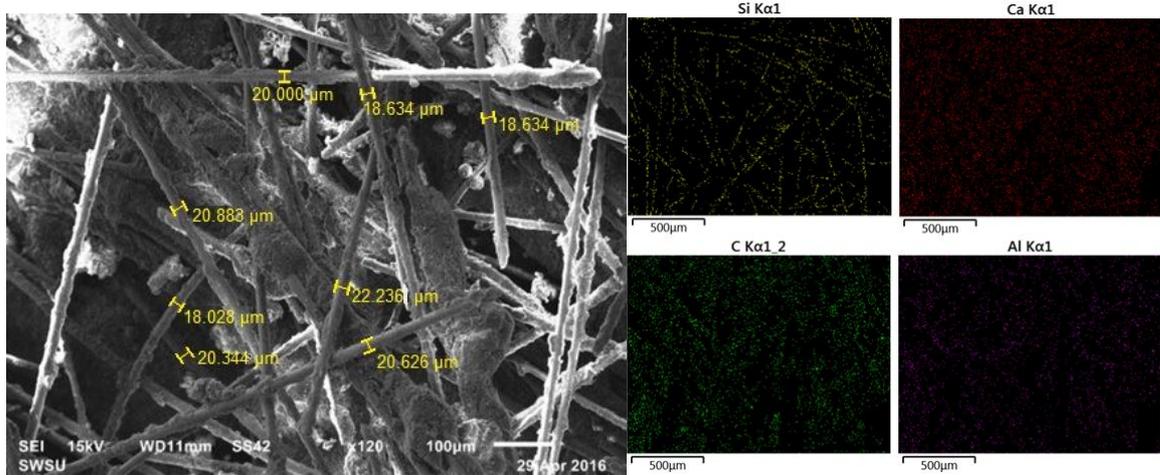


Рис. 2. Электронное изображение поверхности премикса Formix BMC

Fig. 2. Electronic image of the surface of the Formix BMC premix

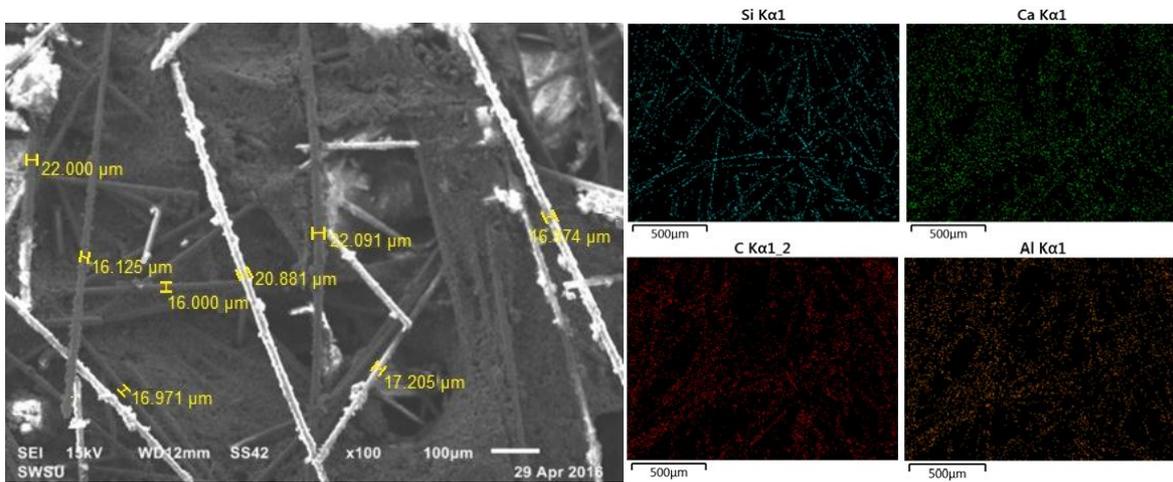


Рис. 3. Электронное изображение поверхности премикса Tetratur F4206

Fig. 3. Electronic image of the surface of the Tetratur F4206 premix

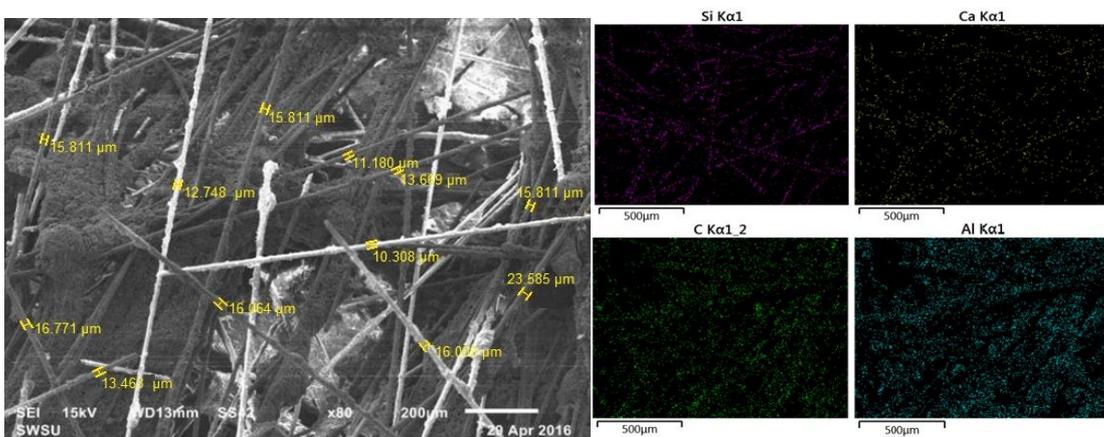


Рис. 4. Электронное изображение поверхности премикса Tetratur F4308

Fig. 4. Electronic image of the surface of the Tetratur F4308 premix

Образцы после изменений массового содержания органической матрицы по измерениям потерь веса и испарения органического связующего представляли собой смесь из дисперсных наполнителей и армирующей фибры. Методом визуального контроля были отделены стекловолоконные элементы фибры от оставшихся неорганических дисперсных компонентов. Для повышения контраста цифровых изображений измеряемые элементы были выложены на листе черной бумаги. Полученные таким образом цифровые изображения обрабатывались с помощью программного пакета Gwyddion. Среднестатистические размеры для каждого из образцов составили: Formix BMC – 1,5; Tetratur F4206 – 2,0; Tetratur F4308 – 5,4 мм.

Полученные данные по размерам фибры для наглядности сведены в таблицу 3, где также представлены расчетные значения аспектных отношений l/d (отношение длины к диаметру волокна). Здесь же приведены значений прочности на изгиб согласно паспортным данным каждого из образцов. Следует отметить явную зависимость прочности на изгиб от l/d . Можно заключить, что прочность стеклопластиков линейно росла с увеличением l/d , что согласовывалось с общими закономерностями, характерными для двумерных наноструктур 2D, что широко известно на примере углеродных нанотрубок с величиной l/d более 103.

Таблица 3. Сравнение размеров фибры и прочности стеклопластика

Table 3. Comparison of fiber sizes and strength of fiberglass

Образец	Средний диаметр волокна d , мкм	Средняя длина волокна l , мм	Отношение l/d	Прочность на изгиб по тех. документации, МПа
Formix BMC	18	1,5	83	80...90
Tetratur F4206	15	2,0	133	120...130
Tetratur F4308	20	5,4	270	150...170

Два образца Formix BMC и Tetratur F4206 схожи по составу, содержат одинаковое связующее, армирующий и дисперсный наполнители. Однако результаты ИК-спектроскопии и изменений массового содержания органической

матрицы по измерениям потерь веса показали, что образец Tetratur F4206 имел большее процентное содержание полимерной матрицы. Он также содержал меньший процент дисперсного наполнителя (кальцита CaCO_3), что подтверждено как результатами ИК-спектро-

скопии, так и данными ЭДА. В Tetradur F4206 по СЭМ-изображениям для армирующих волокон было отмечено существенное увеличение l/d . Это послужило основанием для объяснения повышенной прочности на изгиб для образца Tetradur F4206.

Выводы

Разработанная методика, комбинирующая различные наноаналитические

методы, которые дополняют друг друга, позволяет определять состав входного сырья для стеклопластика, содержащего органические и неорганические компоненты, может быть использована в практическом производстве стеклопластиков в качестве доступного и эффективного инструмента проверки их физико-механических свойств, включая разработки новых премиксов пластмасс с оптимизированными свойствами.

Список литературы

1. Rosato D. V. *Plastics engineered product design*. Oxford; New York: Elsevier Advanced Technology, 2003. 598 p.
2. Strong A. B. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Second ed. Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 2008. 620 p.
3. Баженов С. Л. *Механика и технология композиционных материалов*. М.: Интеллект, 2014. 328 с.
4. Gombos Z. J., McCutcheon P., Savage L. Thermo-mechanical behaviour of composite moulding compounds at elevated temperatures // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 173. P. 106921.
5. Physical properties of novel kenaf short fiber reinforced bulk molding compounds (BMC) for compression moulding / S. Sreenivasan, S. Sulaiman, M. K. A. M. Ariffin, B. T. H. T. Baharudin, K. Abdan // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, no. 1. P. 1226–1232.
6. Faudree M. C., Nishi Y., Salvia M. Increasing impact strength of a short glass fiber compression molded BMC by shortening fibers without change in equipment // *Materials*. 2022. Vol. 15(3). P. 1145.
7. A nanostructured ablative bulk molding compound: Development and characterization / M. Natali, M. Monti, J. M. Kenny, L. Torre // *Composites: Part A*. 2011. Vol. 42. P. 1197–1204/
8. Lee T., Jeong K., Kim D. Development of a lightweight BMC material using fly ash // *Advanced Composite Materials*. 2016. Vol. 26(1). P. 1–10.
9. A direct process to reuse dry fiber production waste for recycled carbon fiber bulk molding compounds / O. Saburow, J. Huether, R. Maertens, A. Trauth, Y. Kechaou, F. Henning, K. A. Weidenmann // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 66. P. 265–270.

10. Faudree M. C., Nishi Y., Gruskiewicz M. A novel “fiber-spacing” model of tensile modulus enhancement by shortening fibers to sub-millimeter in an injection-molded glass fiber reinforced polymer bulk molding compound (GFRP-BMC) // *Materials Transactions*. 2014. Vol. 55, no. 8. P. 1292–1298.
11. Comparison of filler-dependent mechanical properties of jute fiber reinforced sheet and bulk molding compound / M. I. Lautenschlägera, L. Mayerb, J. Gebauera, K. A. Weidenmannab, F. Henninga, P. Elsnerab // *Composite Structures*. 2018. Vol. 203. P. 960–967.
12. Effects of defects in hybrid sheet moulding compound-Evaluation of defects and the impact on mechanical properties / M. Schäferling, B. Häfner, G. Lanza, A. Trauth, K. Weidenmann, M. Thompson // *Materials Science & Engineering Technology*. 2019. Vol. 50, no. 11. P. 1317–1325.
13. Trauth A., Weidenmann K. A. Continuous-discontinuous sheet moulding compounds—effect of hybridisation on mechanical material properties // *Composite Structures*. 2018. Vol. 202. P. 1087–1098.
14. Microstructural analysis and multi-response optimization of mechanical properties of bulk molding compound / P. Rajaei, F. A. Ghasemi, M. Fasihi, N. Amini // *Polymer Composites*. 2022. Vol. 43, no. 1. P. 593–607.
15. Effect of graphite sizes and carbon nanotubes content on flowability of bulk-molding compound and formability of the composite bipolar plate for fuel cell / M.-C. Hsiao, S.-H. Liao, M.-Y. Yen, A. Su, I.-T. Wu, M.-H. Hsiao, S.-Jen. Lee, C.-C. Teng, C.-C. M. Ma // *Journal of Power Sources*. 2010. Vol. 195, no. 17. P. 5645–5650.
16. Experimental analysis and optimization of mechanical and physical properties of light-weight bulk molding compound by design of experiment / P. Rajaei, F. A. Ghasemi, M. Fasihi, M. Saberian // *Journal of Macromolecular Science Part B Physics*. 2021. Vol. 60, no. 4. P. 237–256.
17. Spectrometric identification of organic compounds / R. M. Silverstein, F. X. Webster, D. J. Kiemle, D. L. Bryce. New York: Wiley, 2014. 550 p.
18. Günzler H., Gremlich H.-U. IR Spectroscopy: an introduction. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 374 p.
19. Купцов А. Х., Жижин Г. Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
20. Near-infrared spectroscopy. Principles, instruments, applications / H. W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, H. M. Heise. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 348 p.

References

1. Rosato D. V. *Plastics engineered product design*. Oxford, New York, Elsevier Advanced Technology, 2003. 598 p.

2. Strong A. B. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. Second ed. Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 2008. 620 p.
3. Bazhenov S. L. *Mekhanika i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics and technology of composite materials]. Moscow, Intellect Publ., 2014. 328 p.
4. Gombos Z. J., McCutcheon P., Savage L. Thermo-mechanical behaviour of composite moulding compounds at elevated temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 173, pp. 106921.
5. Sreenivasan S., Sulaiman S., Ariffin M. K. A. M., Baharudin B.T. H. T., Abdan K. Physical properties of novel kenaf short fiber reinforced bulk molding compounds (BMC) for compression moulding. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 1226–1232.
6. Faudree M. C., Nishi Y., Salvia M. Increasing impact strength of a short glass fiber compression molded BMC by shortening fibers without change in equipment. *Materials*, 2022, vol. 15(3), p. 1145.
7. Natali M., Monti M., Kenny J. M., Torre L. A nanostructured ablative bulk molding compound: Development and characterization. *Composites: Part A*, 2011, vol. 42, pp. 1197–1204
8. Lee T., Jeong K., Kim D. Development of a lightweight BMC material using fly. *Advanced Composite Materials*, 2016, vol. 26(1), pp. 1–10.
9. Saburow O., Huether J., Maertens R., Trauth A., Kechaou Y., Henning F., Weidenmann K. A. A direct process to reuse dry fiber production waste for recycled carbon fiber bulk molding compounds. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 66, pp. 265–270.
10. Faudree M., Nishi C. Y., Gruskiewicz M. A novel “fiber-spacing” model of tensile modulus enhancement by shortening fibers to sub-millimeter in an injection-molded glass fiber reinforced polymer bulk molding compound (GFRP-BMC). *Materials Transactions*, 2014, vol. 55, no. 8, pp. 1292–1298.
11. Lautenschlägera M. I., Mayerb L., Gebauera J., Weidenmannab K. A., Henninga F., Elsnerab P. Comparison of filler-dependent mechanical properties of jute fiber reinforced sheet and bulk molding compound. *Composite Structures*, 2018, vol. 203, pp. 960–967.
12. Schäferling M., Häfner B., Lanza G., Trauth A., Weidenmann K., Thompson M. Effects of defects in hybrid sheet moulding compound—Evaluation of defects and the impact on mechanical properties. *Materials Science & Engineering Technology*, 2019, vol. 50, no. 11, pp. 1317–1325.
13. Trauth A., Weidenmann K. A. Continuous-discontinuous sheet moulding compounds—effect of hybridisation on mechanical material properties. *Composite Structures*, 2018, vol. 202, pp. 1087–1098.

14. Rajae P., Ghasemi F. A., Fasihi M., Amini N. Microstructural analysis and multi-response optimization of mechanical properties of bulk molding compound. *Polymer Composites*, vol. 43. no. 1, 2022, pp. 593–607.
15. Hsiao M.-C., Liao S.-H., Yen M.-Y., Su A., Wu I.-T., Hsiao M.-H., Lee S.-Jen., Teng C.-C., Ma C.-C. M. Effect of graphite sizes and carbon nanotubes content on flowability of bulk-molding compound and formability of the composite bipolar plate for fuel cell. *Journal of Power Sources*, 2010, vol. 195, no. 17, pp. 5645–5650.
16. Rajae P., Ghasemi F. A., Fasihi M., Saberian M. Experimental analysis and optimization of mechanical and physical properties of light-weight bulk molding compound by design of experiment. *Journal of Macromolecular Science Part B Physics*, 2021, vol. 60, no. 4, pp. 237–256.
17. Silverstein R. M., Webster F. X., Kiemle D. J., Bryce D. L. Spectrometric identification of organic compounds. New York, Wiley Publ., 2014. 550 p.
18. Günzler H., Gremlich H.-U. IR Spectroscopy: An Introduction. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 2002. 374 p.
19. Kuptsov A. H., Zhizhin G. N. Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov [Fourier-Raman and Fourier-IR spectra of polymers]. Moscow, Technosphere Publ., 2013. 696 p.
20. Siesler H. W., Ozaki Y., Kawata S., Heise H. M. Near-infrared spectroscopy. Principles, instruments, applications. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 2002. 348 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузько Анна Витальевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: avkuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9966-9625

Anna V. Kuzko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: avkuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9966-9625

Кузько Андрей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9698-6123

Andrey E. Kuzko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9698-6123

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

Корниенко Никита Евгеньевич, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kalter_94@mail.ru

Nikita E. Kornienko, Post-Graduate Student of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kalter_94@mail.ru

Новиков Евгений Александрович, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: novikov.2403@mail.ru

Evgeny A. Novikov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: novikov.2403@mail.ru

Зубарева Мария Олеговна, студент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mari.zubareva13@mail.ru

Maria O. Zubareva, Student of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mari.zubareva13@mail.ru