

УДК 678.046

Ж. С. Шашок¹, Е. П. Усс¹, О. А. Кротова¹, А. В. Лешкевич¹,
А. Ю. Люштык², С. Н. Каюшников², Я. М. Прокопович²

¹Белорусский государственный технологический университет

²ОАО «Белшина»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С КОМБИНАЦИЯМИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Изучены технологические свойства резиновых смесей, содержащих комбинацию технического углерода и кремнекислотного наполнителя. В качестве объектов исследования использованы эластомерные композиции на основе натурального каучука, содержащие высокоусиливающий технический углерод марки N347 и кремнекислотный наполнитель марки Perkasil-408. В рецептурах проводилась частичная замена 10,0 и 20,0 мас. ч. технического углерода на минеральный наполнитель при неизменном остальном составе резиновой смеси. Определено, что введение кремнекислотного наполнителя приводит к получению эластомерных композиций с меньшей на 6,1–10,2% вязкостью по Муни резиновых смесей. Частичная замена высокоусиливающего технического углерода на минеральный наполнитель Perkasil-408 улучшает диспергирование наполнителя в объеме эластомерной матрицы за счет уменьшения взаимодействия частиц наполнителя друг с другом, поскольку комплексный динамический модуль смесей с кремнекислотным наполнителем в 1,16–1,69 раза меньше, чем для смеси с техническим углеродом. Установлено, что композиции с комбинацией наполнителей характеризуются повышенной стойкостью к преждевременной вулканизации, но более длительным (на 6,7–18,7%) временем достижения оптимальной степени вулканизации и меньшей в 1,24–1,59 раза скоростью вулканизации, что оказывает влияние на структуру формируемой пространственной сетки.

Ключевые слова: резиновая смесь, технический углерод, кремнекислотный наполнитель, вязкость по Муни, прочность, теплообразование, сопротивление качению.

Для цитирования: Шашок Ж. С., Усс Е. П., Кротова О. А., Лешкевич А. В., Люштык А. Ю., Каюшников С. Н., Прокопович Я. М. Исследование технологических свойств эластомерных композиций с комбинациями наполнителей // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 2 (271). С. 13–18. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-2.

Zh. S. Shashok¹, E. P. Uss¹, O. A. Krotova¹, A. V. Leshkevich¹,
A. Yu. Lyushtyk², S. N. Kayushnikov², Ya. M. Prokopovich²

¹Belarusian State Technological University

²JSC “Belshina”

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ELASTOMER COMPOSITIONS WITH FILLER COMBINATIONS

The technological properties of rubber compounds containing a combination of technical carbon and silica filler have been studied. As objects of study, elastomeric compositions based on natural rubber containing high-reinforcing carbon black grade N347 and silica filler grade Perkasil-408 were used. In the formulations, a partial replacement of 10.0 and 20.0 wt. h. of carbon black on a mineral filler with the rest of the composition of the rubber compound unchanged. It has been determined that the use of a silica filler leads to the production of elastomeric compositions with a 6.1–10.2% lower Mooney viscosity of rubber compounds. Partial replacement of highly reinforcing carbon black with mineral filler Perkasil-408 improves the dispersion of the filler in the volume of the elastomeric matrix by reducing the interaction of filler particles with each other, since the complex dynamic modulus of mixtures with silica filler is 1.16–1.69 times less than for a mixture with carbon black. It has been established that compositions with a combination of fillers are characterized by increased resistance to premature vulcanization, but a 6.7–18.7% longer time to achieve the optimal degree of vulcanization and a 1.24–1.59 times lower vulcanization rate, which affects the structure of the generated spatial grid.

Keywords: rubber compound, carbon black, silica filler, Mooney viscosity, strength, heat generation, rolling resistance.

For citation: Shashok Zh. S., Uss E. P., Krotova O. A., Leshkevich A. V., Lyushtyk A. Yu., Kayushnikov S. N., Prokopovich Ya. M. Investigation of technological properties of elastomer compositions with filler combinations. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 2 (271), pp. 13–18. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-2 (In Russian).

Введение. Главным свойством каучуков, предопределившим их использование в резинах, является эластичность в сочетании с низкой плотностью и износостойкостью, которую многократно увеличивают введением в эластомер активного наполнителя. На сегодняшний день двумя основными высокоактивными наполнителями резин считаются технический углерод и кремнекислотный наполнитель (ККН), а также кремнезем, силика, коллоидная кремнекислота или белая сажа [1, 2].

Технический углерод – один из усилителей каучуков, наиболее часто используемых в резиновой промышленности. Размер частиц технического углерода и его удельная поверхность являются важными факторами, влияющими на конечные свойства изделия. В настоящее время замена технического углерода осажденной кремнекислотой в качестве усиливающего наполнителя считается перспективным направлением улучшения эксплуатационных показателей шин, особенно в рецептуростроении резиновых смесей для протектора легковых и грузовых шин. Особая поверхность кремнезема по сравнению с поверхностью технического углерода при взаимодействии с эластомерами обеспечивает резинам различные динамические свойства. Кроме того, использование только диоксида кремния значительно увеличивает вязкость эластомерных композиций и, следовательно, приводит к проблемам при обработке и отверждении резиновых смесей. В настоящее время для достижения сбалансированного состояния между свойствами сопротивляемости качению, сцепления с мокрой поверхностью и стойкостью шин к истиранию в шинной промышленности часто применяются наполненные кремнекислотным наполнителем эластомерные композиции [3, 4].

Эластомерные композиции, содержащие совместно кремнекислотный наполнитель и технический углерод, привлекают большое внимание из-за комбинированных преимуществ наполнителей, таких как низкий гистерезис, хорошее сопротивление скольжению на мокрой дороге и армирование, особенно подходящее для протектора шин [5–7].

Основная часть. Цель работы – определить влияние частичной замены технического углерода кремнекислотным наполнителем на технологические свойства резиновых смесей.

Объектом исследования являлись эластомерные композиции на основе натурального каучука, предназначенные для изготовления протекторных резин. В составе резиновой смеси использовался высокоусиливающий технический углерод марки N347 и кремнекислотный наполнитель марки Perkasil-408. В рецептуре применялась полуживучая вулканизирующая система. В композициях с

ККН вводился связующий агент бис(3-триэтоксисилилпропил)тетрасульфид (TESPT).

Определение кинетики вулканизации исследуемых резиновых смесей проводили на безроторном реометре MDR 2000 фирмы Alpha Technologies согласно ГОСТ Р 54547–2011 [8]. Определение вязкости по Муни и стойкости к подвулканизации осуществляли методом ротационной вискозиметрии в соответствии с ГОСТ Р 54552–2011 [9].

Определение качественных характеристик распределения наполнителя в резиновой смеси выполняли на основании расчета эффекта Пейна на приборе RPA 2000 согласно ASTM D6601-02 [10]. Испытание проводилось в течение 3 мин при температуре 100°C. В ходе испытания определялись: модуль эластичности при малых амплитудах деформации $G_0'(1\%)$ и модуль сдвига при большой деформации $G_\infty'(100\%)$. Разность данных показателей – комплексный динамический модуль G' . Комплексный динамический модуль количественно характеризует эффект Пейна и отображает качество распределения наполнителя в объеме эластомерной матрицы [11].

Технологические свойства эластомерных композиций позволяют оценивать качество и перерабатываемость на оборудовании полученных резиновых смесей при совершенствовании их рецептуры (табл. 1).

Таблица 1

Технологические свойства исследуемых резиновых смесей

Наполнитель	M , усл. ед. Муни	G' , кПа	Δt , мин
44,0 мас. ч. N347	49,0	205,3	3,0
34,0 мас. ч. N347 + + 10,0 мас. ч. Perkasil-408	44,0	176,3	5,0
24,0 мас. ч. N347 + + 20,0 мас. ч. Perkasil-408	46,0	121,2	7,0

Примечание. M – вязкость по Муни, усл. ед. Муни; G' – комплексный динамический модуль, кПа; Δt – индекс вулканизации, мин.

Определение основных технологических свойств композиций показало, что частичная замена высокоусиливающего технического углерода марки N347 на кремнекислотный наполнитель приводит к уменьшению вязкости по Муни резиновых смесей на 6,1–10,2%. При этом наибольшее изменение вязкости определено для смесей, содержащих меньшее количество ККН, что может быть обусловлено изменением содержания связанного каучука, образующегося при взаимодействии поверхности технического углерода с макромолекулами полимера, а также наличием вторичных агломератов наполнителя при флокуляции первичных агрегатов [1, 2, 12].

В то же время анализ результатов определения комплексного динамического модуля выявил, что с увеличением содержания кремнекислотного наполнителя в эластомерной композиции степень взаимодействия «наполнитель – наполнитель» снижается. В данном случае значение комплексного динамического модуля для смесей с ККН в 1,16–1,69 раза меньше, чем для смеси с техническим углеродом. Ввиду наличия в объеме эластомерной матрицы комбинации наполнителей, характеризующихся существенными различиями свойств поверхности, вероятно, затрудняется взаимодействие частиц наполнителя друг с другом и тем самым уменьшается способность к флокуляции и образованию сеточной структуры [13].

Определение стойкости резиновых смесей к преждевременной вулканизации показало, что частичная замена технического углерода на ККН снижает склонность к подвулканизации (значение индекса вулканизации Δt для композиции с техническим углеродом равно 3 мин, а для композиций с ККН находится в пределах 5–7 мин), что может быть обусловлено дезактивацией ускорителя вулканизации за счет его взаимодействия с функциональными группами поверхности кремнезема [14].

Определение кинетики вулканизации резиновых смесей с использованием реометров позволяет учесть влияние ингредиентов на основные стадии процесса формирования пространственной сетки резины.

Основные кинетические параметры вулканизации исследуемых резиновых смесей приведены в табл. 2.

Установлено, что при введении в эластомерную композицию кремнекислотного наполнителя взамен части технического углерода значение минимального крутящего момента, характеризующего вязкость смесей при заданной температуре, уменьшается с 1,8 до 1,6 дН · м. В то же время определено снижение показателя максимального

крутящего момента, используемого для оценки упругопрочностных свойств вулканизатов. Так, для резиновых смесей с техническим углеродом значение M_H составляет 15,1 дН · м, а для композиций с комбинацией наполнителей находится в пределах 13,3–14,8 дН · м. При этом с увеличением содержания ККН показатель максимального крутящего момента уменьшается в большей степени.

Частичная замена технического углерода приводит к повышению стойкости резиновых смесей к подвулканизации, поскольку показатель времени увеличения минимального крутящего момента возрастает на 5,2–29,9%. В то же время увеличивается время достижения оптимального времени вулканизации на 6,7–18,7% и уменьшается скорость вулканизации в 1,24–1,59 раза. Данные изменения кинетических параметров процесса вулканизации при использовании в составе резиновых смесей кремнекислотного наполнителя обусловлены тем, что на поверхности ККН присутствуют силанольные группы, которые могут вызывать адсорбцию компонентов вулканизирующей системы и тем самым замедлять процесс формирования пространственной сетки вулканизата [14–16].

Определено, что использование кремнекислотного наполнителя в эластомерных композициях при частичной замене технического углерода приводит к некоторому изменению пространственной сетки исследуемых резин. Показатель приращения крутящего момента ΔS позволяет косвенно охарактеризовать плотность сшивания вулканизатов [17]. Так, для композиций с 10,0 мас. ч. ККН значение ΔS не имеет существенных различий по сравнению с композицией с техническим углеродом, но при увеличении дозировки кремнезема до 20,0 мас. ч. указанный показатель уменьшается в 1,12 раза. Такой характер изменения свойств позволяет прогнозировать существенные различия технических характеристик резин, которые в основном зависят от структуры вулканизата.

Таблица 2

Вулканизационные показатели исследуемых резиновых смесей

Наполнитель	M_L , дН · м	M_H , дН · м	t_{s2} , мин	t_{50} , мин	t_{90} , мин	R_h , дН · м/мин	ΔS , дН · м	$\text{tg}\delta(M_H)$	$\text{tg}\delta(M_L)$
44,0 мас. ч. N347	1,8	15,1	7,7	9,6	15,0	2,76	13,24	0,82	0,12
34,0 мас. ч. N347 + + 10,0 мас. ч. Perkasil-408	1,6	14,8	8,1	10,5	16,0	2,22	13,21	0,77	0,05
24,0 мас. ч. N347 + + 20,0 мас. ч. Perkasil-408	1,6	13,3	10,0	12,6	17,8	1,74	11,78	0,71	0,03

Примечание. M_L – минимальный крутящий момент, дН · м; M_H – максимальный крутящий момент, дН · м; t_{s2} – время увеличения минимального крутящего момента на 2 единицы, мин; t_{50} – время достижения заданной степени вулканизации, мин; t_{90} – время достижения оптимальной степени вулканизации, мин; R_h – скорость вулканизации, дН · м/мин; ΔS – разница между максимальным и минимальным крутящими моментами, дН · м; $\text{tg}\delta(M_H)$ – тангенс угла механических потерь при максимальном крутящем моменте; $\text{tg}\delta(M_L)$ – тангенс угла механических потерь при минимальном крутящем моменте.

Анализ характера изменения вулканизационных параметров показал, что значения тангенса угла механических потерь при минимальном и максимальном крутящих моментах для исследуемых композиций с применением кремнекислотного наполнителя уменьшаются, что свидетельствует о снижении гистерезисных потерь.

Заключение. Таким образом, на основании проведенных исследований определено, что частичная замена высокоусиливающего технического углерода на кремнекислотный наполнитель позволяет получать резиновые смеси, характеризующиеся меньшей (на 6,1–10,2%) вязкостью по Муни резиновых смесей и улучшенной (в 1,16–

1,69 раза) диспергируемостью наполнителя в объеме эластомерной матрицы.

Установлено, что увеличение содержания кремнекислотного наполнителя в составе резиновых смесей приводит к повышению стойкости к преждевременной вулканизации, но увеличению времени достижения оптимальной степени вулканизации и замедлению процесса структурирования. Выявленные особенности формирования вулканизационной структуры требуют корректировки как состава вулканизирующей группы, так и дозировки связующего агента с целью получения требуемой кинетики вулканизации многослойного изделия, которым является автомобильная шина.

Список литературы

1. Гришин Б. С. Теория и практика усиления эластомеров. Состояние и направления развития. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 420 с.
2. Каблов В. Ф., Аксёнов В. И. Современные тенденции применения каучуков и наполнителей в рецептуре резин // *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2018. № 3. С. 24–34. DOI: 10.24411/2071-8268-2018-10305.
3. The Effects of Silica/Carbon Black Ratio on the Dynamic Properties of the Tread Compounds in Truck Tires / R. Zafarmehrabian [et al.] // *E-Journal of Chemistry*. 2012. Vol. 9. P. 1102–1112. DOI: 10.1155/2012/571957.
4. Изучение совместного использования технического углерода и диоксида кремния в рецептуре протектора шин. Сообщение 1. Технологические и вулканизационные свойства / В. П. Дорожкин [и др.] // *Каучук и резина*. 2014. № 4. С. 22–25.
5. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties / X. Wang [et al.] // *e-Polymers*. 2021. Vol. 21, no. 1. P. 279–288. DOI: 10.1515/epoly-2021-0034.
6. Correlation of filler networking with reinforcement and dynamic properties of SBR/carbon black/silica composites / W. Feng [et al.] // *Rubber Chemistry and Technology*. 2015. Vol. 88, no. 4. P. 676–689. DOI: 10.5254/rct.15.84881.
7. Natural rubber based composites comprising different types of carbon-silica hybrid fillers. Comparative study on their electric, dielectric and microwave properties, and possible applications / A. A. Al-Ghamdi [et al.] // *Materials Sciences and Applications*. 2016. Vol. 7, no. 6. P. 295.
8. Смеси резиновые. Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров: ГОСТ Р 54547–2011. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
9. Каучуки и резиновые смеси. Определение вязкости, релаксации напряжения и характеристик подвулканизации с использованием вискозиметра Муни: ГОСТ Р 54552–2011. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.
10. Standard Test Method for Rubber Properties – Measurement of Cure and After-Cure Dynamic Properties Using a Rotorless Shear Rheometer: ASTM D6601-02 (2008). URL: <http://www.astm.org> (data of access: 01.02.2023).
11. Mark J., Erman B., Roland M. *The Science and Technology of Rubber*. Washington: Academic Press is an Imprint of Elsevier, 2005. 768 p.
12. Enhancing the mechanical properties of styrene – butadiene rubber by optimizing the chemical bonding between silanized silica nanofiller and the rubber / A. Ansarifard [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 105. P. 322–332.
13. Synergistic effect by high specific surface area carbon black as secondary filler in silica reinforced natural rubber tire tread compounds / S. Sattayanurak [et al.] // *Polymer Testing*. 2020. Vol. 81. Article 106173. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106173.
14. Rheological Properties of Carbon Black/Silica Hybrid Filler in Acrylonitrile Butadiene Rubber / Mh. M. Hasan [et al.] // *International Rubber Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Article 548. DOI: 10.1088/1757-899X/548/1/012005.
15. Grunert F., Wehmeier A., Blume A. New Insights into the Morphology of Silica and Carbon Black Based on Their Different Dispersion Behavior // *Polymers*. 2020. Vol. 2, no. 3. Article 567. DOI: 10.3390/polym12030567.

16. Anand G., Vishvanathperumal S. Properties of SBR/NR Blend: The Effects of Carbon Black/Silica (CB/Si) Hybrid Filler and Silane Coupling Agent // *Research Square*. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-922308/v1.

17. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.

References

1. Grishin B. S. *Teoriya i praktika usileniya elastomerov. Sostoyaniye i napravleniya razvitiya* [Theory and practice of strengthening elastomers. State and directions of development]. Kazan, Izdatel'stvo KNITU Publ., 2016. 420 p. (In Russian).

2. Kablov V. F., Aksyonov V. I. Modern trends in the use of rubbers and fillers in rubber formulations. *Promyshlennoye proizvodstvo i ispol'zovaniye elastomerov* [Industrial production and use of elastomers], 2018, no. 3, pp. 24–34. DOI: 10.24411/2071-8268-2018-10305 (In Russian).

3. Zafarmehrabian R., Gangali S. T., Ghoreishy M. H. R., Davallu M. The Effects of Silica/Carbon Black Ratio on the Dynamic Properties of the Tread Compounds in Truck Tires. *E-Journal of Chemistry*, 2012, vol. 9, pp. 1102–1112. DOI: 10.1155/2012/571957.

4. Dorozhkin V. P., Mohnatkin A. M., Zotov A. L., Mohnatkina E. G. Study of the combined use of carbon black and silicon dioxide in tire tread formulations. Message 1. Technological and curing properties. *Kauchuk i rezina* [Rubber and rubber], 2014, no. 4, pp. 22–25 (In Russian).

5. Wang X., Wu L., Yu H., Xiao T., Li H., Yang J. Analysis of effect of modification of silica and carbon black co-filled rubber composite on mechanical properties. *e-Polymers*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 279–288. DOI: 10.1515/epoly-2021-0034.

6. Feng W., Tang Zh., Weng P., Guo B. Correlation of filler networking with reinforcement and dynamic properties of SSBR/carbon black/silica composites. *Rubber Chemistry and Technology*, 2015, vol. 88, no. 4, pp. 676–689. DOI: 10.5254/rct.15.84881.

7. Al-Ghamdi A. A., Al-Hartomy O. A., Al-Solamy F. R., Dishovsky N., Mihaylov M., Malinova P., Atanasov N. Natural rubber based composites comprising different types of carbon-silica hybrid fillers. Comparative study on their electric, dielectric and microwave properties, and possible applications. *Materials Sciences and Applications*, 2016, vol. 7, no. 6, p. 295.

8. GOST R 54547–2011. Rubber compounds. Determination of vulcanization characteristics using rotary rheometers. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. (In Russian).

9. GOST R 54552–2011. Rubbers and rubber compounds. Determination of viscosity, stress relaxation and scorch characteristics using a Mooney viscometer. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 22 p. (In Russian).

10. ASTM D6601-02 (2008). Standard Test Method for Rubber Properties – Measurement of Cure and After-Cure Dynamic Properties Using a Rotorless Shear Rheometer. Available at: <http://www.astm.org> (accesses 01.02.2023).

11. Mark J., Erman B., Roland M. *The Science and Technology of Rubber*. Washington, Academic Press is an Imprint of Elsevier, 2005. 768 p.

12. Ansarifar A., Wang L., Ellis R. J., Kirtley S. P., Riyazuddin N. Enhancing the mechanical properties of styrene – butadiene rubber by optimizing the chemical bonding between silanized silica nanofiller and the rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 105, pp. 322–332.

13. Sattayanurak S., Sahakaro K., Kaewsakul W., Dierkes W. K., Reuvekamp L. A. E. M., Blume A., Noordermeer J. W. M. Synergistic effect by high specific surface area carbon black as secondary filler in silica reinforced natural rubber tire tread compounds. *Polymer Testing*, 2020, vol. 81, article 106173. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106173.

14. Hasan Mh. M., Kler J. K., Ong S. K., Manroshan S. Rheological Properties of Carbon Black/Silica Hybrid Filler in Acrylonitrile Butadiene Rubber. *International Rubber Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, article 548. DOI: 10.1088/1757-899X/548/1/012005.

15. Grunert F., Wehmeier A., Blume A. New Insights into the Morphology of Silica and Carbon Black Based on Their Different Dispersion Behavior. *Polymers*, 2020, vol. 2, no. 3, article 567. DOI: 10.3390/polym12030567.

16. Anand G., Vishvanathperumal S. Properties of SBR/NR Blend: The Effects of Carbon Black/Silica (CB/Si) Hybrid Filler and Silane Coupling Agent. *Research Square*, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-922308/v1.

17. Аверко-Антонович И. Ю., Бикмуллин Р. Т. *Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov* [Methods for studying the structure and properties of polymers]. Kazan, KGTU Publ., 2002. 604 p. (In Russian).

Информация об авторах

Шашок Жанна Станиславовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Усс Елена Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: uss@belstu.by

Кротова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: o.krotova@belstu.by

Лешкевич Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, ассистент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nastyonke@mail.ru

Люштык Андрей Юрьевич – главный химик, начальник лаборатории. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

Каюшников Сергей Николаевич – кандидат технических наук, начальник инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: vdv90@mail.ru

Прокопович Ярослав Михайлович – инженер-технолог исследовательского сектора центральной заводской лаборатории инженерно-технического центра. ОАО «Белшина» (213824, г. Бобруйск, ул. Минское шоссе, Республика Беларусь). E-mail: prokopovichyam@belshina.by

Information about the authors

Shashok Zhanna Stanislavovna – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Uss Elena Petrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uss@belstu.by

Krotova Olga Aleksandrovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: o.krotova@belstu.by

Leshkevich Anastasiya Vladimirovna – PhD (Engineering), assistant lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastyonke@mail.ru

Lyushtyk Andrey Yur'yevich – Chief Chemist, Head of the Laboratory. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: jb133xxxx@gmail.com

Kayushnikov Sergey Nikolaevich – PhD (Engineering), Head of the Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: vdv90@mail.ru

Prokopovich Yaroslav Mikhaylovich – process engineer of the Research Sector of the Central Factory Laboratory of the Engineering and Technical Center. JSC “Belshina” (Minskoye shosse str., 213824, Bobruisk, Republic of Belarus). E-mail: prokopovichyam@belshina.by

Поступила 16.03.2023