






Свойства и структурные особенности эпоксикомпозитов, армированных модифицированным ПАН-жгутиком

Наталья Г. Зубова	1	zubova_aptech@mail.ru	 0000-0003-2678-2568
Виктория М. Герасимова	1	gerasimova.victoria@ya.ru	 0000-0001-7619-6511
Наталья Л. Левкина	2	levkinan78@yandex.ru	 0000-0002-6836-9264
Татьяна П. Устинова	2	ustinovatp@mail.ru	 0000-0003-1333-7000
Константин Б. Костин	3	kbkoston@gmail.com	 0000-0001-6934-9399

1 Балаковский инженерно-технологический институт, ул. Чапаева, 140, г. Балаково, Саратовская обл., 413800, Россия



2 Энгельский технологический институт, пл. Свободы, 17, г. Энгельс, Саратовская обл., 413111, Россия

3 Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия

Аннотация. Эксплуатационные характеристики композиционных материалов, армированных полиакрилонитрильным техническим жгутиком (ПАН-ТЖ), обладающим реакционной активностью функциональных групп, могут быть улучшены путем его модификации. Целью работы являлось исследование влияния полиакрилонитрильных волокнистых материалов, аппретированных модификаторами АГМ-9, А-187, А-174 и Duron OS 3151, на кинетику процесса отверждения эпоксидной смолы ЭД-20, структурные особенности разработанных композитов и их эксплуатационные свойства. В работе применялись методы кинетического исследования, дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), сканирующей электронной микроскопии и механических испытаний композиционных материалов. Показано влияние модифицированных ПАН-ТЖ на изменение кинетики процесса отверждения эпоксидного связующего, характеризующееся увеличением времени отверждения, уменьшением максимальной температуры отверждения и снижением энергии активации отверждения ЭД-20. Результаты кинетических исследований подтверждаются данными ДСК эпоксидных композиций на основе модифицированных ПАН-ТЖ, которые показывают снижение максимальной температуры и увеличение тепловых эффектов процесса отверждения ЭД-20 в присутствии исследуемых армирующих систем по сравнению с эпоксикомпозитом, армированным немодифицированным жгутиком. Структурообразование эпоксидных композиций в более мягких условиях обеспечивает образование контактной зоны между элементарными волокнами и связующим, способствующей повышению монолитности пластиков по сравнению с композитом на основе исходного ПАН-ТЖ. Сравнительный анализ прочностных свойств исследуемых композитов показал, что при введении в ЭД-20 аппретированных ПАН-ТЖ наблюдается улучшение прочностных показателей. Проведенная оценка кинетических параметров, структурных особенностей и прочностных свойств разработанных композитов, армированных модифицированными ПАН-ТЖ, свидетельствует о повышении поверхностной активности волокнистых материалов в результате их модификации.

Ключевые слова: полиакрилонитрильный технический жгут, модификаторы, эпоксидное связующее, кинетика отверждения, композиционные материалы, морфология поверхности, деформационно-прочностные свойства.

Properties and structural features of epoxycomposites reinforced with modified PAN- flagellum

Natalya G. Zubova	1	zubova_aptech@mail.ru	 0000-0003-2678-2568
Victoria M. Gerasimova	1	gerasimova.victoria@ya.ru	 0000-0001-7619-6511
Natalya L. Levkina	2	levkinan78@yandex.ru	 0000-0002-6836-9264
Tatyana P. Ustinova	2	ustinovatp@mail.ru	 0000-0003-1333-7000
Konstantin B. Kostin	3	kbkoston@gmail.com	 0000-0001-6934-9399

1 Balakovo Institute of Engineering and Technology, st. Chapaev, 140, Balakovo, Saratov region, 413800, Russia

2 Engels Institute of Technology, Svobody Square, 17, Engels, Saratov region, 413111, Russia

3 Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, st. Polytechnic, 77, Saratov, 410054, Russia

Abstract. The performance characteristics of composite materials reinforced with polyacrylonitrile technical flagellum (PAN-TF), which has the reactivity of functional groups, can be improved by modifying it. The aim of the work was to study the effect of polyacrylonitrile fibrous materials, applied with AGM-9, A-187, A-174 and Duron OS 3151 modifiers, on the kinetics of the ED-20 epoxy resin curing process, structural features of the developed composites and their operational properties. The methods of kinetic research, differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy and mechanical testing of composite materials were used in the work. The effect of modified PAN-TF on the change in the kinetics of the curing process of the epoxy binder is shown, characterized by an increase in the curing time, a decrease in the maximum curing temperature and a decrease in the activation energy of the curing ED-20. The results of kinetic studies are confirmed by the data of DSC epoxy compositions based on modified PAN-TF, which show a decrease in the maximum temperature and an increase in the thermal effects of the ED-20 curing process in the presence of the studied reinforcing systems compared with epoxy composite reinforced with unmodified flagellum. The structure formation of epoxy compositions under milder conditions ensures the formation of a contact zone between the elementary fibers and the binder, which contributes to an increase in the solidity of plastics compared to a composite based on the original PAN-TF. A comparative analysis of the strength properties of the studied composites showed that when applied to ED-20, there is an improvement in strength indicators. The assessment of kinetic parameters, structural features and strength properties of the developed composites reinforced with modified PAN-TF indicates an increase in the surface activity of fibrous materials as a result of their modification.

Keywords: polyacrylonitrile technical flagellum, modifiers, epoxy binder, curing kinetics, composite materials, surface morphology, deformation and strength properties.

Для цитирования

Зубова Н.Г., Герасимова В.М., Левкина Н.Л., Устинова Т.П., Костин К.Б. Свойства и структурные особенности эпоксикомпозитов, армированных модифицированным ПАН-жгутиком // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 4. С. 200–205. doi:10.20914/2310-1202-2022-4-200-205

For citation

Zubova N.G., Gerasimova V.M., Levkina N.L., Ustinova T.P., Kostin K.B. Properties and structural features of epoxycomposites reinforced with modified PAN- flagellum. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 200–205. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-4-200-205

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Полиакрилонитрильный технический жгут, обладающий реакционной активностью функциональных групп [1–4] и способностью к улучшению физико-механических свойств и адгезионной совместимости к эпоксидному связующему вследствие его аппретирования модификаторами – 3-аминопропилтриэтоксисиланом (АГМ-9), 3-глицидоксипропилтриметоксисиланом (А-187), 3-метакрилоксипропилтриметоксисиланом (А-174), комбинацией гликолевых эфиров жирных кислот – Dugon OS 3151, может быть рекомендован в качестве перспективной армирующей системы в технологии армированных пластиков [5–16].

Цель работы – исследование влияния модифицированных полиакрилонитрильных волокнистых материалов на кинетику процесса отверждения эпоксидной смолы, структурные особенности разработанных композитов и их эксплуатационные свойства.

Материалы и методы

Армированные пластики получали путем введения в смесь эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587–84, ФКП «Завод имени Я.М. Свердлова», Россия) и отвердителя полиэтиленполиамин (ТУ 2413–066–18777143–15, ЗАО «Завод органических продуктов», Россия) (массовое соотношение ЭД-20 и ПЭПА – 10:1) однонаправленного непрерывного полиакрилонитрильного технического жгута (ПАН-ТЖ) (ТУ 6–06-С253–87, ООО «СНВ», Россия) (массовое соотношение ЭД-20 и ПАН-ТЖ 1:1), предварительно модифицированного 5%-ными водными растворами аппретов: АГМ-9 (CAS 919–30–2, ООО «Пента силиконы», Россия), А-187 (CAS 2530–83–8, ООО «Пента силиконы», Россия), А-174 (CAS 2530–85–0, ООО «Пента силиконы», Россия) и Dugon OS 3151 (1907/2006/EG, СНТ Р. Beitlich GMBH, Германия). Формование волокнонаполненной эпоксидной композиции проводили компрессионным прессованием (температура 110 ± 5 °C, давление $5 \pm 0,5$ МПа).

Кинетику процессов структурообразования эпоксикомпозиций, содержащих модифицированные волокнистые материалы, исследовали по изменению времени гелеобразования, времени отверждения, максимальной температуры отверждения, энергии активации и тепловых эффектов отверждения, определяемых на дифференциальном сканирующем калориметре DSC-500B (ГОСТ Р 55134–2012) [17–19]. Степень отверждения определялась весовым методом.

При помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU и сканирующего электронного микроскопа Aspek Explorer со встроенным энергодисперсионным детектором изучена морфология поверхности композитов [20].

Механические испытания образцов эпоксидных композиционных материалов на растяжение, сжатие и изгиб проводили на разрывной машине ИР 5046–5 (ГОСТ 11262–2017, ГОСТ 4651–2014, ГОСТ 4648–2014), на твердость по Бринеллю – на твердомере ТМ-2М (ГОСТ 4670–2015). При этом скорость растяжения составляла $5 \pm 1,0$ мм/мин, скорость сжатия – $2 \pm 1,0$ мм/мин, скорость нагружения при испытании на изгиб – $2 \pm 0,5$ мм/мин.

Результаты и обсуждение

Для анализа влияния модифицированных полиакрилонитрильных жгутов на процесс структурообразования эпоксикомпозиций при отверждении эпоксидного связующего были получены кривые отверждения (рисунок 1), по которым были определены параметры процесса отверждения (таблица 1).

По данным проведенного исследования видно, что модификация полиакрилонитрильных жгутов практически не влияет на время гелеобразования, но увеличивает время отверждения на 11–17% и снижает максимальную температуру отверждения на 20–25%. Изменение данных кинетических показателей является следствием повышения поверхностной активности волокнистых материалов в результате их модификации и свидетельствует о структурообразовании эпоксидной матрицы в более мягких условиях. Кроме того, введение модифицированных волокон в эпоксидное связующее обеспечивает снижение энергии активации процесса отверждения (на 16–24%) и способствует повышению степени отверждения эпоксидных композитов.

Результаты исследования кинетики отверждения композиций на основе модифицированных полиакрилонитрильных волокнистых материалов подтверждаются данными дифференциальной сканирующей калориметрией (ДСК) (таблица 2), характеризующими снижение максимальной температуры отверждения эпоксидного связующего (на 15–19%). При этом наблюдается увеличение тепловых эффектов процесса отверждения эпоксидного связующего при введении модифицированных армирующих систем (на 8–13%) по сравнению с эпоксикомпозитом на основе немодифицированного ПАН-жгута.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) поверхности исследуемых композитов приведены на рисунке 2.

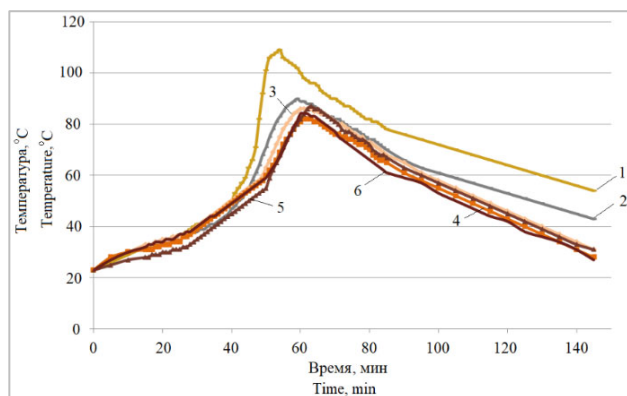


Рисунок 1. Кинетические кривые процесса отверждения эпоксикомпозитов: 1 – ЭД-20; 2 – ЭД-20+ПАН-ТЖ; 3 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+АГМ-9; 4 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-187; 5 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-174; 6 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+Duron OS 3151

Figure 1. Kinetic curves of the curing process of epoxycompositions: 1 – ED-20; 2 – ED-20+PAN-TF; 3 – ED-20+PAN-TF+AGM-9; 4 – ED-20+PAN-TF+A-187; 5 – ED-20+PAN-TF+A-174; 6 – ED-20+PAN-TF+Duron OS 3151

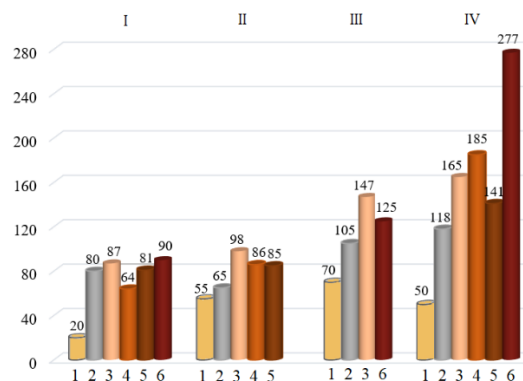


Рисунок 2. Деформационно-прочностные свойства эпоксикомпозитов (I – разрушающее напряжение при растяжении, МПа; II – разрушающее напряжение при сжатии, МПа; III – изгибающее напряжение, МПа; IV – твердость по Бринеллю, МПа): 1 – ЭД-20; 2 – ЭД-20+ПАН-ТЖ; 3 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+АГМ-9; 4 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-187; 5 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-174; 6 – ЭД-20+ПАН-ТЖ+Duron OS 3151

Figure 2. Deformation and strength properties of epoxycomposites (I – tensile stress, MPa; II – compressive stress, MPa; III – bending stress, MPa; IV – Brinell hardness, MPa): 1 – ED-20; 2 – ED-20+PAN-TF; 3 – ED-20+PAN-TF+AGM-9; 4 – ED-20+PAN-TF+A-187; 5 – ED-20+PAN-TF+A-174; 6 – ED-20+PAN-TF+Duron OS 3151

Таблица 1.

Параметры процесса отверждения эпоксикомпозитов

Table 1.

Parameters of the curing process of epoxycompositions

Состав пластиков Composition of plastics	Время, мин Time, min		Максимальная температура отверждения, °C Maximum curing temperature, °C	Энергия активации, кДж/моль Activation energy, kJ/mol	Степень отверждения, % Curing degree, %
	гелеобразования gelation	отверждения curing			
ЭД-20 ED-20	27	54	109	58	96
ЭД-20+ПАН-ТЖ ED-20+PAN-TF	27	59	90	58	99
ЭД-20+ПАН-ТЖ+АГМ-9 ED-20+PAN-TF+AGM-9	27	60	86	44	99
ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-187 ED-20+PAN-TF+A-187	26	61	82	45	99
ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-174 ED-20+PAN-TF+A-174	27	63	87	49	99
ЭД-20+ПАН-ТЖ+Duron OS 3151 ED-20+PAN-TF+Duron OS 3151	28	60	84	48	99

Таблица 2.

Результаты ДСК эпоксидных композиций

Table 2.

Results of DSC epoxy compositions

Состав пластиков Composition of plastics	(T _H -T _K), °C	T _{max} , °C	Тепловой эффект процесса отверждения, Дж/г Thermal effect of the curing process, J/g
ЭД-20 ED-20	66–176	110	559
ЭД-20+ПАН-ТЖ ED-20+PAN-TF	60–168	96	288
ЭД-20+ПАН-ТЖ+АГМ-9 ED-20+PAN-TF+AGM-9	56–165	93	325
ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-187 ED-20+PAN-TF+A-187	58–165	89	324
ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-174 ED-20+PAN-TF+A-174	59–166	94	314
ЭД-20+ПАН-ТЖ+Duron OS 3151 ED-20+PAN-TF+Duron OS 3151	57–167	91	312

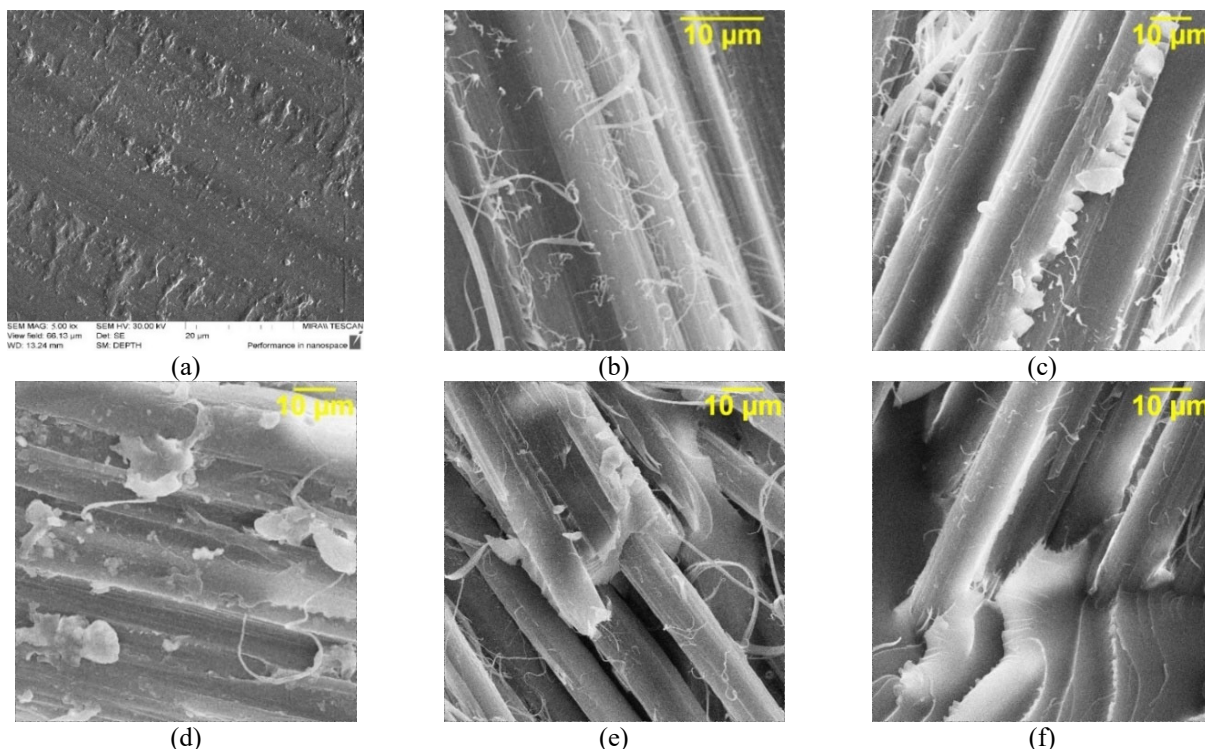


Рисунок 3. Фотографии поверхности композитов, полученные методом СЭМ (n=2500): (a) – ЭД-20; (b) – ЭД-20+ПАН-ТЖ; (c) – ЭД-20+ПАН-ТЖ+АГМ-9; (d) – ЭД-20+ПАН-ТЖ+А-187; (e) – ЭД-20+ПАН-ТЖ+Duron OS 3151

Figure 3. Photos of the surface of composites obtained by the SEM method (n=2500): (a) – ED-20; (b) – ED-20+PAN-TF; (c) – ED-20+PAN-TF+AGM-9; (d) – ED-20+PAN-TF+A-187; (e) – ED-20+PAN-TF+A-174; (f) – ED-20+PAN-TF+Duron OS 3151

Фотографии морфологии поверхности образцов композитов, армированных модифицированными АГМ-9, А-187, А-174 и Duron OS 3151 полиакрилонитрильными жгутиками (рисунок 2, в-е) показывают наличие контактной зоны между элементарными волокнами и эпоксидным связующим, способствующей повышению монолитности пластика по сравнению с композитом на основе исходного ПАН-ТЖ (рисунок 2, б).

По данным механических испытаний разработанных композитов (рисунок 3) видно, что при введении аппретированных полиакрилонитрильных нитей в ЭД-20 наблюдается улучшение прочностных показателей по сравнению

с пластиком, армированным немодифицированным волокном: разрушающее напряжение при сжатии увеличивается на 31–51%, изгибающее напряжение – на 19–40%, твердость по Бринеллю – на 19–134%.

Заключение

Введение ПАН-ТЖ, аппретированных АГМ-9, А-187, А-174 и Duron OS 3151, повышающими поверхностную активность нитей, в эпоксидное связующее способствует формированию монолитной структуры композиционных материалов в более мягких условиях и сопровождается улучшением их деформационно-прочностных свойств.

Литература

- 1 Yang Z., Yao Y., Huang Y., Chen W., Dong X. Surface Modification Method of Polyacrylonitrile (PAN) Fibers by L-cysteine Coupling Protein // *Fibers Polymers*. 2019. V. 20. P. 2581–2586. DOI: 10.1007/s12221-019-9343-8
- 2 Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
- 3 Хасанов О.Х., Исмаилов Р.И. Модификация полиакрилонитрильных волокон мономерными солями на основе аминокислот с галоидсодержащими веществами // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 1 (319). С. 66–72. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_1_66
- 4 Sunil S., Abhilas J.K., Kumar A., Shukla H.K. Oxidative Stabilization Studies on Pretreated Polyacrylonitrile Precursor Fiber Suitable For Carbon Fiber. Production // *AIP Conference Proceedings*, Published Online, 25 October, 2019. V. 2166. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5131605> (дата обращения 25.01.2023).
- 5 Цвайфель Х. и др. Добавки к полимерам. Справочник. СПб: ЦОП «Профессия», 2016. 1088 с.

- 6 Rogovina S.Z., Prut E.V., Berlin A.A. Composite Materials Based on Synthetic Polymers Reinforced with Natural Fibers // *Polymer Science, Series A*. 2019. V. 61. P. 417–438. DOI: 10.1134/S0965545X19040084
- 7 Khandelwal S., Rhee K.Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface // *Composites Part B: Engineering*. 2020. V. 192. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108011
- 8 Shapagin A.V. et al. Epoxyorganosilane Finishing Compositions for Fibrous Fillers of Thermosetting and Thermoplastic Binders // *Polymers*. 2022. V. 14. № 1. P. 59–73. DOI: 10.3390/polym14010059
- 9 Rajan R., Rainosalo E., Thomas S.P., Ramamoorthy S.K., Zavašnik J., Vuorinen J., Skrifvars M. Modification of epoxy resin by silane-coupling agent to improve tensile properties of viscose fabric composites // *Polymer Bulletin*. 2018. V. 75. P. 167–195. DOI: 10.1007/s00289-017-2022-2
- 10 Musayeva A. Yu. et al. Properties of modified epoxy resins (Review) // *Sciences of Europe*. 2018. № 33. P. 22–29.
- 11 Rajan R. et al. Mechanical, Thermal and Burning Properties of Viscose Fabric Composites – Influence of Epoxy Resin Modification // *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. V. 135. № 36. P. 1134–1148.
- 12 Shcherbakov A.S. et al. Effect of Carbon Nanotube Functionalization on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Fiber-Reinforced Composites Based on an Epoxy Resin. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021. V. 94, P. 1080–1087. DOI: 10.1134/S1070427221080097
- 13 Liu F., Shi Z., Dong Yu. Improved wettability and interfacial adhesion in carbon fibre/epoxy composites via an aqueous epoxy sizing agent // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. V. 112. P. 337–345. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.06.026
- 14 Belgacemi R., Derradji M., Mehelli O., Trache D., Liu W., Wang J. Highly advanced phthalonitrile composites from epoxy-ended hyperbranched poly(trimellitic anhydride ethylene glycol) ester grafted basalt fibers // *Polymer Composites*. 2021. V. 42. № 8. P. 3882–3891. DOI: 10.1002/pc.26100
- 15 Korchina L.V., Zubova N.G., Popova N.E., Ustinova T.P. Effect of polyacrylonitrile fibers modified by various chemical finishes on the hardening kinetics properties of an epoxide composite based on them // *Fibre Chemistry*. 2015. № 6. P. 360–362. DOI: 10.1007/s10692-015-9621-1
- 16 Зубова Н.Г., Устинова Т.П. Оценка эффективности процесса получения модифицированного ПАН-ТЖ, используемого в технологии эпоксидных композитов // *Материалы международного научно-технического симпозиума «EESTE-2021»*, Москва, 20–21 октября, 2021. – С. 297–300. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-297-300
- 17 Грелльманн В., Зайдлер С. Испытания пластмасс. СПб: ЦОП «Профессия», 2010. 720 с.
- 18 Блазнов А.Н., Журковский М.Е., Фирсов В.В., Самойленко В.В., Бычин Н.В., Атысова Е.В. Исследование физико-механических свойств связующего на основе отвердителя Этал-45М // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2019. № 3 (27). С. 100–107. DOI: 10.25699/SSSB.2019.27.37228
- 19 Нган Н.В. и др. Влияние кремнийорганического модификатора на процесс отверждения эпоксидного олигомера // *Успехи в химии и химической технологии*. 2018. Т. XXXII. № 6. С. 106–108.
- 20 Rydz J., Shishkova A., Eckstein A.A. Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy: Topographic and Dynamical Surface Studies of Blends, Composites, and Hybrid Functional Materials for Sustainable Future // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. V. 2019. P. 1–16. DOI: 10.1155/2019/6871785


References

- 1 Yang Z., Yao Y., Huang Y., Chen W., Dong X. Surface Modification Method of Polyacrylonitrile (PAN) Fibers by L-cysteine Coupling Protein. *Fibers Polymers*. 2019. vol. 20. pp. 2581–2586. doi: 10.1007/s12221-019-9343-8
- 2 Perepelkin K.E. Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites. SPb, Scientific foundations and technologies, 2009. 380 p. (in Russian).
- 3 Khasanov O. Kh., Ismailov R.I. Modification of polyacrylonitrile fibers monomeric salts based on aminoalkyl acrylates with halogen containing substances. *Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology*. 2021. no 1 (319). pp. 66–72. doi: 10.47367/0021-3497_2021_1_66 (in Russian).
- 4 Sunil S., Abhilas J.K., Kumar A., Shukla H.K. Oxidative Stabilization Studies on Pretreated Polyacrylonitrile Precursor Fiber Suitable For Carbon Fiber. Production. AIP Conference Proceedings, Published Online, 25 October, 2019. vol. 2166. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5131605> (дата обращения 25.01.2023).
- 5 Zweifel H., Maier R.D., Schiller M. *Plastics Additives*. Handbook. SPb: CEP "Profession", 2016. 1088 p. (in Russian).
- 6 Rogovina S.Z., Prut E.V., Berlin A.A. Composite Materials Based on Synthetic Polymers Reinforced with Natural Fibers. *Polymer Science, Series A*. 2019. vol. 61. pp. 417–438. doi: 10.1134/S0965545X19040084
- 7 Khandelwal S., Rhee K.Y. Recent advances in basalt-fiber-reinforced composites: Tailoring the fiber-matrix interface. *Composites Part B: Engineering*. 2020. vol. 192. pp. 1–13. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108011
- 8 Shapagin A.V. et al. Epoxyorganosilane Finishing Compositions for Fibrous Fillers of Thermosetting and Thermoplastic Binders. *Polymers*. 2022. vol. 14. no 1. pp. 59–73. doi: 10.3390/polym14010059
- 9 Rajan R. et al. Modification of epoxy resin by silane-coupling agent to improve tensile properties of viscose fabric composites. *Polymer Bulletin*. 2018. vol. 75. pp. 167–195. doi: 10.1007/s00289-017-2022-2
- 10 Musayeva A.Yu. et al. Properties of modified epoxy resins (Review). *Sciences of Europe*. 2018. No 33. P. 22–29.
- 11 Rajan R. et al. Mechanical, Thermal and Burning Properties of Viscose Fabric Composites – Influence of Epoxy Resin Modification. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. vol. 135. no. 36. pp. 1134–1148.
- 12 Shcherbakov A.S., Mostovoy A.S., Yakovlev N.A., Arzamastsev S.V. Effect of Carbon Nanotube Functionalization on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Fiber-Reinforced Composites Based on an Epoxy Resin. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021. vol. 94. pp. 1080–1087. doi: 10.1134/S1070427221080097
- 13 Liu F., Shi Z., Dong Yu. Improved wettability and interfacial adhesion in carbon fibre/epoxy composites via an aqueous epoxy sizing agent. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. vol. 112. pp. 337–345. doi: 10.1016/j.compositesa.2018.06.026


- 14 Belgacemi R., Derradji M., Mehelli O., Trache D., Liu W., Wang J. Highly advanced phthalonitrile composites from epoxy-ended hyperbranched poly(trimellitic anhydride ethylene glycol) ester grafted basalt fibers. *Polymer Composites*. 2021. vol. 42. no 8. pp. 3882–3891. doi: 10.1002/pc.26100
- 15 Korchina L.V., Zubova N.G., Popova N.E., Ustinova T.P. Effect of polyacrylonitrile fibers modified by various chemical finishes on the hardening kinetics proprieties of an epoxide composite based on them. *Fibre Chemistry*. 2015. no 6. pp. 360–362. doi: 10.1007/s10692–015–9621–1
- 16 Zubova N.G., Ustinova T.P. Evaluation of the efficiency of the process of obtaining modified PAN-TF used in the technology of epoxy composites. Materials of the International Scientific and technical symposium «EESTE-2021», Moscow, October 20–21, 2021. – pp. 297–300. doi: 10.37816/eeste-2021–1–297–300. (in Russian).
- 17 Grellmann V., Seidler S. *Polymer Testing*. SPb: CEP "Profession", 2010. 720 p. (in Russian).
- 18 Blaznov A.N. et al. Study of physicomachanical behavior of binder based on Etal-45M curing agent // *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2019. no 3 (27). pp. 100–107. doi: 10.25699/SSSB.2019.27.37228 (in Russian).
- 19 Ngan N.V., Malakhovskii S.S., Kostromina N.V., Ivashkina V.N. Influence of the siliconorganic modifactor for the curing of the curing of the epoxy oligomer // *Russian Chemical Reviews*. 2018. vol. XXXII. no 6. pp. 106–108. (in Russian).
- 20 Rydz J., Shishkova A., Eckstein A.A. Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy: Topographic and Dynamical Surface Studies of Blends, Composites, and Hybrid Functional Materials for Sustainable Future. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. vol. 2019. pp 1–16. doi: 10.1155/2019/6871785

Сведения об авторах


Наталья Г. Зубова к.т.н., доцент, кафедра физики и естественнонаучных дисциплин, Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», ул. Чапаева, 140, г. Балаково, Саратовская обл., 413800, Россия, zubova_aptech@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2568>


Виктория М. Герасимова к.т.н., доцент, кафедра физики и естественнонаучных дисциплин, Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», ул. Чапаева, 140, г. Балаково, Саратовская обл., 413800, Россия, gerasimova.victoria@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7619-6511>

Наталья Л. Левкина к.т.н., доцент, кафедра технологии и оборудования химических, нефтегазовых и пищевых производств, Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., пл. Свободы, 17, г. Энгельс, Саратовская обл., 413111, Россия, levkinan78@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6836-9264>

Татьяна П. Устинова д.т.н., профессор, кафедра технологии и оборудования химических, нефтегазовых и пищевых производств, Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., пл. Свободы, 17, г. Энгельс, Саратовская обл., 413111, Россия, ustinovatp@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1333-7000>

Константин Б. Костин к.т.н., старший научный сотрудник, научно-образовательный центр нанотехнологий и наноматериалов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия, kbkostin@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6934-9399>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Natalya G. Zubova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, department of physics and natural sciences, Balakovo Institute of Engineering and Technology - branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», st. Chapaev, 140, Balakovo, Saratov region, 413800, Russia, zubova_aptech@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2568>


Victoria M. Gerasimova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, department of physics and natural sciences, Balakovo Institute of Engineering and Technology - branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», st. Chapaev, 140, Balakovo, Saratov region, 413800, Russia, gerasimova.victoria@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7619-6511>

Natalya L. Levkina Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technology and equipment for chemical, oil and gas and food industries department, Engels Institute of Technology (branch) of Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Svobody Square, 17, Engels, Saratov region, 413111, Russia, levkinan78@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6836-9264>

Tatyana P. Ustinova Dr. Sci. (Engin.), professor, technology and equipment for chemical, oil and gas and food industries department, Engels Institute of Technology (branch) of Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, Svobody Square, 17, Engels, Saratov region, 413111, Russia, ustinovatp@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1333-7000>

Konstantin B. Kostin Cand. Sci. (Engin.), senior researcher, scientific and educational center of nanotechnologies and nanomaterials, Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, st. Polytechnic, 77, Saratov, 410054, Russia, kbkostin@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6934-9399>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/09/2022	После редакции 30/09/2022	Принята в печать 12/10/2022
Received 12/09/2022	Accepted in revised 30/09/2022	Accepted 12/10/2022