

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ**Т.В. Бурдикова, С.С. Ившин**

Татьяна Владимировна Бурдикова (ORCID 0009-0001-4534-7863), Сергей Сергеевич Ившин (ORCID 0000-0002-4085-7215)*

Кафедра «Технология изделий из пиротехнических и композиционных материалов», Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015

E-mail: burdickova@yandex.ru, IvshinSS@corp.knrtu.ru*

В работе исследовано влияние параметров плазмохимической обработки поверхности арамидного волокна марки «Русар» на свойства волокнистого наполнителя и композиционного материала с полиуретановой матрицей СКУ ПФЛ-100 на его основе. В результате оценки физико-механических характеристик волокон с модифицированной поверхностью установлена зависимость поведения волокнистого материала от мощности высокочастотных плазменных разрядов. Микроструктурный анализ поверхности показал наличие дефектов, возникающих в результате плазмохимической обработки, что может быть обусловлено сопутствующими процессами окислительной деструкции органического материала. При этом отмечены признаки функционализации поверхности, выражающиеся в снижении краевого угла смачивания модифицированных арамидных волокон. Показано, что плазмохимическая обработка поверхности волокнистого наполнителя, входящего в состав композиционного материала на полиуретановой матрице, приводит к изменению физико-механических свойств всего композита. Зависимость прочностных характеристик композиционного материала на основе модифицированного наполнителя от мощности высокочастотных разрядов носит экстремальный характер с максимумом 1000 Вт. Показана тенденция к увеличению физико-механических показателей композитов с модифицированным арамидным волокном при увеличении времени плазмохимической обработки. Проведена аппроксимация экспериментальных данных и получены зависимости прочности композиционного материала состоящего из полиуретана СКУ ПФЛ-100, наполненного арамидным волокном, от параметров плазмохимической обработки поверхности наполнителя (мощности высокочастотного разряда, времени воздействия и природы плазмообразующего газа). Рекомендован режим модификации поверхности арамидного волокна высокочастотными разрядами плазмы азота с целью повышения адгезионного взаимодействия на границе матрица-наполнитель: мощность разряда 1000 Вт, время воздействия 5 мин.

Ключевые слова: арамидное волокно, модификация поверхности, композиционный материал, плазмохимическая обработка, мощность разряда, время обработки, плазмообразующий газ, предел прочности, полиуретан, азот, граница раздела

Для цитирования:

Бурдикова Т.В., Ившин С.С. Влияние плазмохимической обработки на свойства арамидных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 121–127. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.7153.

For citation:

Burdikova T.V., Ivshin S.S. Effect of plasma-chemical treatment on the properties of aramid fibers and polymer composite materials based on them. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 5. P. 121–127. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.7153.

EFFECT OF PLASMA-CHEMICAL TREATMENT ON THE PROPERTIES OF ARAMID FIBERS AND POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON THEM

T.V. Burdikova, S.S. Ivshin

Tatyana V. Burdikova (ORCID 0009-0001-4534-7863), Sergey S. Ivshin (ORCID 0000-0002-4085-7215)*

Department of Technology of Products from Pyrotechnic and Composite Materials, Kazan National Research Technological University, K. Marks st., 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015, Russia

E-mail: burdickova@yandex.ru, IvshinSS@corp.knrtu.ru*

The paper presents the results of a study assessing the influence of the parameters of plasma-chemical surface treatment of aramid fiber of the "Rusar" brand on the properties of fibrous filler and composite material with a polyurethane matrix SKU PFL-100 based on them. As a result of evaluating the physical and mechanical characteristics of fibers with a modified surface, a dependence of the behavior of the fibrous material on the power of high-frequency plasma discharges was established. Microstructural analysis of the surface showed the presence of defects resulting from plasma-chemical treatment, which may be due to concomitant processes of oxidative destruction of organic material. At the same time, signs of surface functionalization are noted, expressed in a decrease in the contact angle of modified aramid fibers. It has been shown that plasma-chemical treatment of the surface of a fibrous filler included in a composite material on a polyurethane matrix leads to a change in the physical and mechanical properties of the entire composite. Dependence of strength properties of composite material based on modified filler on power of high-frequency discharges is extreme with maximum of 1000 W. Tendency to increase in physical and mechanical properties of composites with modified aramid fiber with increase in time of plasma-chemical treatment is shown. Approximation of experimental data is carried out and dependences of strength of composite material consisting of polyurethane SKU PFL-100, filled with aramid fiber, on parameters of plasma-chemical treatment of filler surface (power of high-frequency discharge, time of action and nature of plasma-forming gas) were obtained. The recommended mode of modification of the aramid fiber surface by high-frequency discharges of nitrogen plasma in order to increase the adhesive interaction at the matrix-filler interface is: discharge power 1000 W, exposure time 5 min.

Keywords: aramid fiber, surface modification, composite material, plasma-chemical treatment, discharge power, treatment time, plasma-forming gas, tensile strength, polyurethane, nitrogen, interface

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РФ разрабатывается и создается новое поколение специальных композиционных материалов на основе арамидных волокон, конкурентно способных по сравнению с традиционными конструкционными материалами из металлов, их сплавов и керамики. Важным показателем их эксплуатационных свойств является легкость, механическая прочность, износостойкость и химическая инертность [1-6].

Волокнистые материалы являются несущим каркасом композитного материала, воспринимающая основную механическую нагрузку на материал. Определенным недостатком этих материалов является недостаточное сопротивление сдвиговым напряжениям, возникающим на границе, матрица-наполнитель. Усиление связей на границе, раздела является одним из эффективных решений и воз-

можно за счет модификации поверхности волокнистого наполнителя [7]. Одним из перспективных направлений такой модификации является плазмохимическая обработка поверхности вводимого наполнителя [8-12]. Исследования показывают, что в результате воздействия высокочастотных разрядов происходит функционализация и изменение морфологии поверхности арамидного волокна, а также возможно «залечивание» микродефектов, возникающих в процессе производства и хранения волокна [13-22].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования рассмотрены образцы композиционного материала на полиуретановой основе в форме стержня. В качестве связующего использован форполимер SKU ПФЛ-100 (АО «Казанский завод синтетического каучука»), отвержденный 4,4'-метилена-бис-ортохлора-

нилином, а в качестве армирующего наполнителя – арамидное волокно марки «Русар».

Арамидное волокно и форполимер предварительно просушивались при температуре 60 °С до постоянной массы, после чего добавлялся отвердитель и осуществлялась пропитка волокнистого наполнителя. Степень наполнения составила ~ 75%. Пропитанные образцы волокна закреплялись в подвешенном положении вертикально для дальнейшего отверждения.

Модификация поверхности волокна осуществлялась воздействием высокочастотного емкостного разряда пониженного давления по следующему режиму:

- время обработки – 2-5 мин;
- мощность разряда 900-1500 Вт;
- расход плазмообразующего газа 1500 см³/мин;
- плазмообразующий газ – воздух, азот;
- остаточное давление в камере 22-25 Па.

Отрезок волокна длиной 2 м наматывался на рамку из диэлектрического материала (оргстекло) так, чтобы обрабатываемый материал не касался

самого себя и помещался между электродами в середине вакуумной камеры.

Определение физико-механических характеристик (предел прочности на растяжение $\sigma_{\max}$, модуль Юнга E , относительная деформация при растяжении ε) проводилось на универсальной испытательной машине Galdabini Quasar 100.

Оценку краевого угла смачивания проводили следующим образом: на поверхность волокна при помощи ручного пульверизатора наносили капли дистиллированной воды, после чего осуществлялось микрофотографирование поверхности образца при помощи микроскопа Olympus BX51 и измерение угла смачивания поверхности волокна каплями, расположенными перпендикулярно оси наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проводимых исследований проведена оценка влияния природы плазмообразующего газа и мощности разряда при постоянном времени воздействия (5 мин) на физико-механические характеристики волокнистого наполнителя. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытания арамидных волокон
Table 1. Aramid fiber test results

Газ	$\sigma_{\max}$, МПа при мощности, Вт			E , МПа при мощности, Вт			ε , % при мощности, Вт		
	900	1000	1200	900	1000	1200	900	1000	1200
Без обработки	1352,4			12089,2			18,8		
Воздух	1322,1	981,0	1201,6	19856,2	16859,6	22385,5	13,0	13,0	10,3
Азот	1282,0	1210,7	1151,9	19580,4	18342,7	22639,8	13,9	14,1	10,9

С увеличением мощности высокочастотного разряда отмечается тенденции к снижению прочности арамидного волокна, увеличению модуля упругости и соответствующему снижению относительной деформации вне зависимости от природы плазмообразующего газа. При этом отмечаются некоторые флуктуации значений при мощности разряда 1000 Вт.

Плазменная обработка представляет собой сложный комплекс физико-химических процессов, связанных с электрическим, температурным и химическим воздействием на поверхность, что может послужить причиной как образования новых структур, так и деструктивных процессов. Кроме того, состояние плазмы кратно увеличивает активность атомов О и N, что, по всей видимости, приводит к интенсификации процесса окислительной деструкции и приводит к снижению прочности и модуля упругости модифицированного арамидного волокна

при увеличении мощности с 900 до 1000 Вт. Вероятно, указанная мощность разряда (1000 Вт) является переходной с преобладанием деструктивных процессов, что подтверждается микроскопическим анализом поверхности волокна (рис. 1).



Рис. 1. Микрофотография дефектов волокна
Fig. 1. Microphotograph of fiber defects

Анализ результатов оценки смачиваемости модифицированных волокон показал, что краевой угол смачивания снижается в 2-2,5 раза по сравнению с углом смачивания исходного волокна (табл. 2).

Проведенные исследования показали, что модификация волокон в среде рассмотренных плазмообразующих газов придает арамидному волокну свойство гидрофильности, как следствие функционализации поверхности, улучшающее процесс смачивания связующим полимером.

Таблица 2

Влияние природы плазмообразующего газа на краевой угол смачивания модифицированных волокон
Table 2. Effect of the nature of the plasma-forming gas on the contact angle of modified fibers

Природа газа	Краевой угол смачивания, градус
Без обработки	135
Воздух	55
Азот	65

С использованием модифицированных арамидных волокон были изготовлены образцы однонаправленного композиционного материала с полиуретановым связующим. Затем было проведено исследование влияния модификации поверхности наполнителя на физико-механические свойства подготовленных образцов материала.

Проведенные эксперименты (рис. 2, 3) показали тенденцию к увеличению прочности композиционного материала на основе модифицированных арамидных волокон в зависимости от времени

их плазмохимической обработки. Наибольшее значение прочности зафиксировано при воздействии мощностью 1000 Вт в течение 5 мин вне зависимости от природы плазмообразующего газа.

Зависимость прочности композиционного материала на полиуретановой основе от мощности высокочастотного плазменного разряда имеет экстремальный характер.

Аппроксимация полученных данных позволяет получить зависимости следующего типа:

- воздух

$$\sigma_{900} = 134,61t^2 - 945,69t + 2307,2 \quad (1)$$

$$\sigma_{1000} = -2,4668t^2 + 34,197t + 893,15 \quad (2)$$

$$\sigma_{1200} = -1,8742t^2 + 25,981t + 678,56 \quad (3)$$

- азот

$$\sigma_{900} = 10,625t^2 + 30,083t + 442 \quad (4)$$

$$\sigma_{1000} = -215,44t^2 + 1749,8t - 1843,7 \quad (5)$$

$$\sigma_{1200} = -125,58t^2 + 1020t - 1074,7 \quad (6)$$

В табл. 3 приведены сравнительные характеристики полиуретановых композиций, включающие арамидное волокно до и после модификации.

Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность применения поверхностной обработки арамидных волокон высокочастотными разрядами плазмы азота и воздуха с целью повышения прочностных характеристик полиуретановых композиционных материалов на их основе.

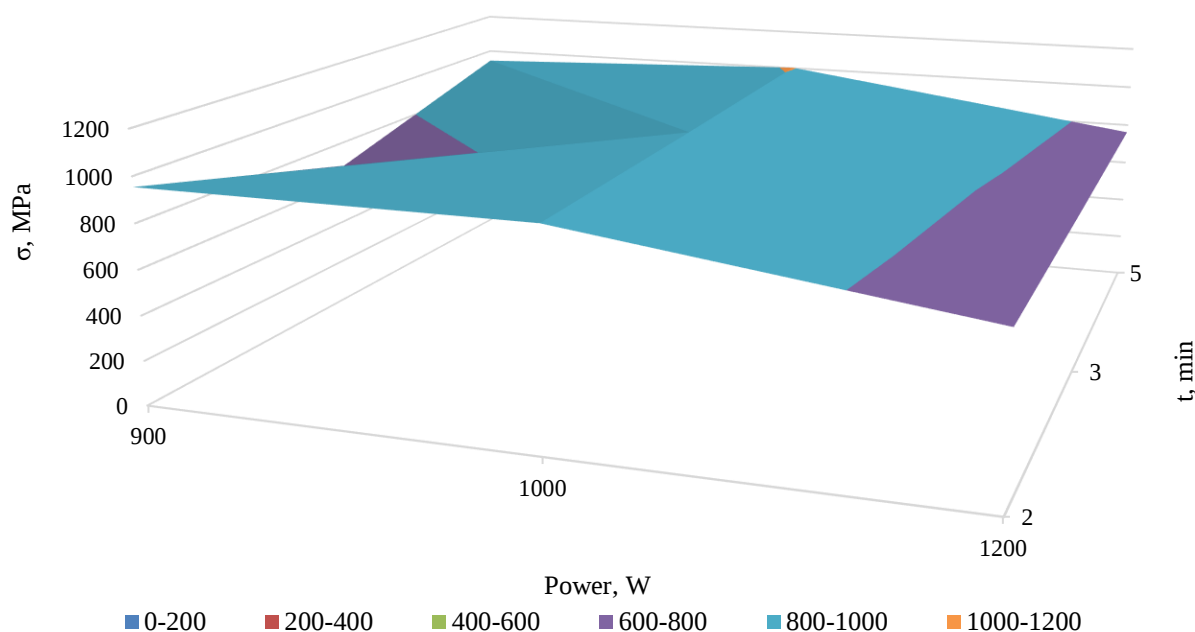


Рис. 2. Влияние режима обработки арамидного волокна плазмой воздуха на прочность композиционного материала на его основе
 Fig. 2. Effect of air plasma treatment of aramid fiber on the strength of a composite material based on it

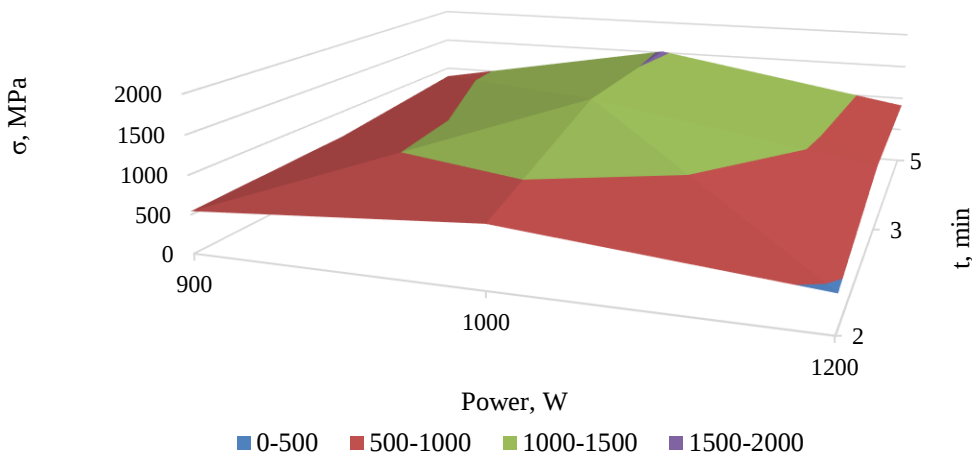


Рис. 3. Влияние технологических режимов обработки арамидного волокна плазмой азота на прочность композиционного материала на его основе

Fig. 3. The influence of technological modes of processing aramid fiber with nitrogen plasma on the strength of composite material based on it

Таблица 3
Влияние модификации наполнителей на характеристики полиуретановых композиций на их основе
Table 3. Effect of fillers modification on the characteristics of polyurethane compositions based on them

Образец	Режим, Вт/мин/среда	σ, МПа	E, МПа	ε, %
ПУ	-	37,63	29,1	499,7
ПУ+АВ	-	1313,1	23942,2	11,2
ПУ+АВ	1000/5/азот	1519,4	10596,0	20,6
ПУ+АВ	1000/5/воздух	1002,5	16942,8	11,5

Показано, что, регулируя технологические режимы модификации волокон, можно изменять физико-механические характеристики материалов на их основе. Получено, что оптимальными режимами модификации арамидных волокон являются мощность разряда 1000 Вт, а время обработки 5 мин, что позволяет получить высокие прочностные характеристики наполненных полиуретановых композиций.

Из представленных данных видно, что применение плазменной обработки позволяет повысить прочностные характеристики полиуретановых систем. Так модификация арамидного волокна в среде азота позволяет повысить прочность ком-

позиционного материала до 16%. При этом отмечается снижение модуля упругости наполненных композиций в 2,3 раза. В данном случае снижение жесткости структуры является положительным результатом, что улучшает релаксацию возникающих напряжений, тем самым повышая порог наступления предельного состояния материала.

ВЫВОДЫ

Эксперименты показали, что плазмохимическая обработка поверхности арамидных волокон может быть эффективным способом улучшения их свойств для использования в композиционных материалах. Это позволяет улучшить взаимодействие между компонентами материала и повысить степень реализации заложенного в них потенциала.

На основе проведенного анализа полученных данных предложен режим плазмохимической обработки арамидных волокон высокочастотными разрядами плазмы азота в течение 5 мин при мощности заряда 1000 Вт.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор). *Авиац. материалы и технологии*. 2023. № 2(71). С. 122-144. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных

REFERENCES

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aircraft construction (review). *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2023. N 2 (71). P. 122-144 (in Russian). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Zhelezina G.F., Gulyaev I.N., Solovieva N.A. New generation aramid organoplastics for aircraft structures. *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2017. N S. P. 368-378 (in Russian).

- конструкций. *Авиац. материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 368-378.
3. **Дориомедов М.С.** Рынок арамидного волокна: виды, свойства, применение. *Тр. ВИАМ*. 2020. № 11 (93). С. 48-59. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-48-59.
4. **Карпычева Ю.С., Краснов А.И., Доронкина Ю.С., Кашаев В.А.** Создание опытного производства мономера для арамидных волокон третьего поколения типа Русар-НТ для нужд ракетно-космической промышленности. Союз машиностроителей России. Национальная научно-техническая конференция. 2024. № 1. С. 32-35 DOI: 10.24412/cl-35807-2024-1-32-35.
5. **Бахтеева К.Ю., Мусина Т.К., Дянкова Т.Ю.** Волокно Арлана - перспективное сырьё для производства огнестойких материалов. *Изв. СПбГТИ (ТУ)*. 2022. № 62 (88). С. 21-24. DOI: 10.36807/1998-9849-2022-62-88-21-24.
6. **Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Шульдешова П.М., Куршев Е.В.** Структура и физико-механические свойства органопластика нового поколения на основе ткани из арамидного волокна марки Русар-НТ и расплавленного связующего. *Тр. ВИАМ*. 2022. № 10 (116). С. 55-65 DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65.
7. **Кокшаров С.А., Корнилова Н.Л., Федосов С.В.** Модификация полиэфирного волокна для создания композитных материалов с регулируемой жесткостью. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 6. С. 105-111. DOI: 10.6060/tcct.20165906.5364k.
8. **Сергеева Е.А., Абдуллин И.Ш., Зенитова Л.А., Костина К.Д.** Анализ способов модификации волокнистых материалов. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2015. Т. 18. № 20. С. 164-167.
9. **Гордина Н.Е., Мельников А.А., Гусев Г.И., Гущин А.А., Румянцев Р.Н., Астраханцева И.А.** Использование механохимической и плазмохимической обработок при синтезе каталитических систем на основе вермикулита и оксихлорида циркония. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 43-57. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6612.
10. **Lim C., Ha S., Ha N.** Plasma treatment of CFX: the effect of surface chemical modification coupled with surface etching. *Carbon Lett.* 2024. V. 34. P. 611-617. DOI: 10.1007/s42823-023-00597-x.
11. **Ciobanu R., Mihăilă I., Borcia C., Borcia G.** Adhesion Properties and Stability of Polar Polymers Treated by Air Atmospheric Pressure Plasma. *Polymers*. 2024. V. 16. P. 1552. DOI: 10.3390/polym16111552.
12. **Amparán-Estrada A.C.** Improvement of tensile strength and toughness in aramid/epoxy composites by sequential air plasma and (3-glycidyloxypropyl) trimethoxysilane treatments. *Adv. Compos. Mater.* 2024. V. 33. N 6. P. 1-14. DOI: 10.1080/09243046.2024.2324491.
13. **Ибатуллина А.Р., Сергеева Е.А.** Применение плазменной модификации для повышения смачиваемости арамидных волокон. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 5. С. 44-47.
14. **Шарафеев Р.Ф., Абдуллин И.Ш., Шаехов М.Ф.** Модификация арамидных нитей высокочастотным разрядом пониженного давления. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 17. С. 94-96.
15. **Сергеева Е.А., Ибатуллина А.Р., Костина К.Д.** Применение плазменной модификации для улучшения прочностных характеристик арамидного волокна. *Технол. текстил. пром-сти*. 2016. Т. 1. № 361. С. 90-93.
16. **de Lange P.J., Akker P.G.** Adhesion Activation of Twaron Aramid Fibers for Application in Rubber: Plasma Versus
3. **Doriomedov M.S.** Aramid fiber market: types, properties, application. *Trudy VIAM*. 2020. N 11 (93). P. 48-59 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-48-59.
4. **Karpycheva Yu.S., Krasnov A.I., Doronkina Yu.S., Kashaev V.A.** Creation of a pilot production of a monomer for third-generation aramid fibers of the Rusar-NT type for the needs of the rocket and space industry. Union of Mechanical Engineers of Russia. National Scientific and Technical Conference. 2024. N 1. P. 32-35 (in Russian). DOI: 10.24412/cl-35807-2024-1-32-35.
5. **Bakhteeva K.Yu., Musina T.K., Dyankova T.Yu.** Arlan fiber - a promising raw material for the production of fire-resistant materials. *Izv. St. Petersburg State Technical University (TU)*. 2022. N 62 (88). P. 21-24 (in Russian). DOI: 10.36807/1998-9849-2022-62-88-21-24.
6. **Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Shuldesheva P.M., Kurshev E.V.** Structure and physical and mechanical properties of a new generation organoplastic based on fabric made of aramid fiber of the Rusar-NT brand and a melt binder. *Trudy VIAM*. 2022. N 10 (116). P. 55-65 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65.
7. **Koksharov S.A., Kornilova N.L., Fedosov S.V.** Modification of polyester fibers to create composite materials with adjustable rigidity. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2016. V. 59. N 6. P. 105-111. DOI: 10.6060/tcct.20165906.5364k.
8. **Sergeeva E.A., Abdullin I.Sh., Zenitova L.A., Kostina K.D.** Analysis of methods for modifying fibrous materials. *Vest. Kazan Technol. University*. 2015. V. 18. N 20. P. 164-167 (in Russian).
9. **Gordina N.E., Melnikov A.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rumyantsev R.N., Astrakhantseva I.A.** Mechanochemical and plasmachemical processing in the synthesis of catalytic systems based on vermiculite and zirconium oxychloride. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 5. P. 43-57 DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6612.
10. **Lim C., Ha S., Ha N.** Plasma treatment of CFX: the effect of surface chemical modification coupled with surface etching. *Carbon Lett.* 2024. V. 34. P. 611-617. DOI: 10.1007/s42823-023-00597-x.
11. **Ciobanu R., Mihăilă I., Borcia C., Borcia G.** Adhesion Properties and Stability of Polar Polymers Treated by Air Atmospheric Pressure Plasma. *Polymers*. 2024. V. 16. P. 1552. DOI: 10.3390/polym16111552.
12. **Amparán-Estrada A.C.** Improvement of tensile strength and toughness in aramid/epoxy composites by sequential air plasma and (3-glycidyloxypropyl) trimethoxysilane treatments. *Adv. Compos. Mater.* 2024. V. 33. N 6. P. 1-14. DOI: 10.1080/09243046.2024.2324491.
13. **Ibatullina A.R., Sergeeva E.A.** Application of plasma modification to improve the wettability of aramid fibers. *Vest. Kazan Technol. University*. 2013. V. 16. N 5. P. 44-47 (in Russian).
14. **Sharafiev R.F., Abdullin I.Sh., Shaekhov M.F.** Modification of aramid yarns by high-frequency discharge of low pressure. *Vest. Kazan Technol. University*. 2013. V. 16. N 17. P. 94-96 (in Russian).
15. **Sergeeva E.A., Ibatullina A.R., Kostina K.D.** Application of plasma modification to improve the strength characteristics of aramid fiber. *Tekhnol. Textile Prom.* 2016. V. 1. N 361. P. 90-93 (in Russian).
16. **de Lange P.J., Akker P.G.** Adhesion Activation of Twaron Aramid Fibers for Application in Rubber: Plasma Versus Chemical Treatment. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2012. V. 26, N 6. P. 827-839. DOI: 10.1163/016942411X580036.

- Chemical Treatment. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2012. V. 26. N 6. P. 827–839. DOI: 10.1163/016942411X580036.
17. **Lu Z., Hu W., Xie F., Hao Y., Liu G.** Argon low-temperature plasma modification of chopped aramid fiber and its effect on paper performance of aramid sheets. *J. Appl. Polym. Sci.* 2017. V. 134. N 34. P. 45215. DOI: 10.1002/app.45215.
 18. **Shakerinasab E., Bavi E.P., Balagna C., Ferraris M.** A promising method for promoting interfacial adhesion of aramid/rubber composite using atmospheric pressure plasma surface modification. *Polym. Compos.* 2024. V. 45. P. 6950–6969. DOI: 10.1002/pc.282406950.
 19. **Song J.** Effect and mechanism analysis of plasma treatment on electrical and mechanical properties of aramid fiber–epoxy resin interface. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2023. V. 51. N 12. P. 3655–3666. DOI: 10.1109/TPS.2023.3335136.
 20. **Sohbatzadeh F., Shakerinasab E., Mirzanejhad S.** Surface modification of aramid yarn by atmospheric pressure plasma: Reinforcement and floating properties. *Polymer Test.* 2023. V. 117. 107836. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107836.
 21. **Ibatullina A.** Structural and chemical changes of aramid fibers modified by low temperature plasma. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1588. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012020.
 22. **Sun Y., Liang Q., Chi H.** The application of gas plasma technologies in surface modification of aramid fiber. *Fibers and Polymers.* 2014. V. 15. P. 1–7. DOI: 10.1007/s12221-014-0001-x.
 17. **Lu Z., Hu W., Xie F., Hao Y., Liu G.** Argon low-temperature plasma modification of chopped aramid fiber and its effect on paper performance of aramid sheets. *J. Appl. Polym. Sci.* 2017. V. 134. N 34. P. 45215. DOI: 10.1002/app.45215.
 18. **Shakerinasab E., Bavi E.P., Balagna C., Ferraris M.** A promising method for promoting interfacial adhesion of aramid/rubber composite using atmospheric pressure plasma surface modification. *Polym. Compos.* 2024. V. 45. P. 6950–6969. DOI: 10.1002/pc.282406950.
 19. **Song J.** Effect and mechanism analysis of plasma treatment on electrical and mechanical properties of aramid fiber–epoxy resin interface. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2023. V. 51. N 12. P. 3655–3666. DOI: 10.1109/TPS.2023.3335136.
 20. **Sohbatzadeh F., Shakerinasab E., Mirzanejhad S.** Surface modification of aramid yarn by atmospheric pressure plasma: Reinforcement and floating properties. *Polym. Test.* 2023. V. 117. P. 107836. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107836.
 21. **Ibatullina A.** Structural and chemical changes of aramid fibers modified by low temperature plasma. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1588. P. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012020.
 22. **Sun Y., Liang Q., Chi H.** The application of gas plasma technologies in surface modification of aramid fiber. *Fibers Polym.* 2014. V. 15. P. 1–7. DOI: 10.1007/s12221-014-0001-x.

Поступила в редакцию 21.10.2024

Принята к опубликованию 09.01.2025

Received 21.10.2024

Accepted 09.01.2025