

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СОЛЬВОЛИЗА

Д.К. Трухинов, Е.А. Лебедева, Е.В. Иванова, Т.С. Истомина, С.А. Астафьева

Денис Константинович Трухинов (ORCID 0000-0003-3044-9864)*, Елена Анатольевна Лебедева (ORCID 0000-0001-5847-0396), Елена Витальевна Иванова (ORCID 0000-0002-8511-1580), Татьяна Станиславовна Истомина (ORCID 0000-0001-6668-9574), Светлана Асылхановна Астафьева (ORCID 0000-0003-2018-2908)

Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН), ул. Академика Королева, 3, Пермь, Российская Федерация, 614013

E-mail: dtruhinov@gmail.com*, itch.elena@mail.ru, kornilicina.lena@mail.ru, istominas@yandex.ru, svetlana-astafeva@yandex.ru

В работе представлены результаты комплексного исследования влияния структуры углеродных волокон и типа исходного полимерного композита на качество извлеченного волокна, полученного методом низкотемпературного сольволиза. Были проанализированы характеристики исходных и извлеченных углеродных волокон с применением широкого спектра экспериментальных методов, включая структурные (рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния) и термические исследования. Сольволиз проводили в смеси $H_2SO_{4(конц.)}$: $H_2O_{2(конц.)}$: H_2O в массовом соотношении 2,5:3:1 соответственно при температуре кипения раствора. Время рециклинга составляло 1 ч с заменой раствора каждые 20 мин. Результаты электронной микроскопии показали, что вне зависимости от типа полимерной системы, на поверхности волокон практически не наблюдается остатков связующего. С помощью синхронного термического анализа было показано, что основная потеря массы всех образцов извлеченного волокна происходит при температуре выше $600^{\circ}C$. Исходные углеродные волокна с гладкой структурой поверхности показывают большую термостабильность, чем волокна с рельефной структурой (температура потери массы 5% - $650^{\circ}C$ и $620^{\circ}C$ соответственно). При этом, вне зависимости от полимерного связующего, извлеченные волокна той же марки обладают более низкими значениями потери массы. С целью оценки деструктивного влияния сольволизного раствора в процессе извлечения, методом спектроскопии комбинационного рассеяния были изучены структурные изменения поверхности углеродных волокон. Степень графитизации оценивалась по соотношению площадей пиков D (дефектная составляющая) и G (графитовая составляющая). Было показано снижение степени графитизации после проведения сольволиза для обоих типов углеродных волокон. Методом рентгенофазового анализа определены размеры кристаллитов образцов углеродных волокон. Результаты показали уменьшение кажущейся толщины L_c и поперечного размера кристаллита L_a для всех образцов после сольволиза.

Ключевые слова: низкотемпературный сольволиз, углеродное волокно, рециклат

EFFICIENCY OF CARBON FIBER EXTRACTION BY LOW-TEMPERATURE SOLVOLYSIS

D.K. Trukhinov, E.A. Lebedeva, E.V. Ivanova, T.S. Istomina, S.A. Astaf'eva

Denis K. Trukhinov (ORCID 0000-0003-3044-9864)*, Elena A. Lebedeva (ORCID 0000-0001-5847-0396), Elena V. Ivanova (ORCID 0000-0002-8511-1580), Tatiana S. Istomina (ORCID 0000-0001-6668-9574), Svatlana A. Astaf'eva (ORCID 0000-0003-2018-2908)

Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Akademika Koroleva st., 3, Perm, 614013, Russia

E-mail: dtruhinov@gmail.com*, itch.elena@mail.ru, kornilicina.lena@mail.ru, istominas@yandex.ru, svetlana-astafeva@yandex.ru

The paper presents the results of a comprehensive study of the effect of the structure of carbon fibers and the type of the initial polymer composite on the quality of the reclaimed fiber obtained by low-temperature solvolysis. The characteristics of the initial and reclaimed carbon fibers were analyzed using a wide range of experimental methods, including structural (X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy) and thermal studies. Solvolysis was carried out in a mixture of H_2SO_4 (conc.): H_2O_2 (conc.): H_2O in a mass ratio of 2.5:3:1, respectively, at the boiling point of the solution. The recycling time was 1 h with a solution change every 20 min. The results of electron microscopy showed that, regardless of the type of polymer system, there are practically no binder residues on the surface of the fibers. Using thermal analysis, it was shown that the main mass loss of all samples of the reclaimed fiber occurs at temperatures above 600 °C. Despite the fact that origin fibers with a smooth surface show greater thermal stability than those with a relief structure (mass loss temperature of 5% - 650°C and 620°C, respectively), extracted fibers based on the same brand have lower mass loss values. In order to assess the destructive effect of the solvolysis solution during extraction, the structural changes in the carbon fiber surface were studied by the method of Raman spectroscopy. The degree of graphitization was estimated by the ratio of the peak areas D (defective component) and G (graphite component). A decrease in the degree of graphitization after solvolysis was shown for both types of carbon fibers. The crystallite sizes of carbon fiber samples were determined by X-ray diffraction analysis. The results showed a decrease in the apparent thickness of L_c and the transverse size of the L_a crystallite for all samples after solvolysis.

Keywords: low-temperature solvolysis, carbon fiber, recycling

Для цитирования:

Трухинов Д.К., Лебедева Е.А., Иванова Е.В., Истомина Т.С., Астафьева С.А. Эффективность извлечения углеродного волокна методом низкотемпературного сольволиза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 4. С. 59–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7162.

For citation:

Trukhinov D.K., Lebedeva E.A., Ivanova E.V., Istomina T.S., Astaf'eva S.A. Efficiency of carbon fiber extraction by low-temperature solvolysis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 4. P. 59–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20256804.7162.

ВВЕДЕНИЕ

Растущее использование термореактивных композитов, армированных углеродным волокном (УВ), в аэрокосмической промышленности и автомобилестроении привело к значительному росту количества отходов производства и отходов изделий, выведенных из эксплуатации – до 30% препрегов в итоге оказываются отходами производства изделий [1-8]. Вследствие этого, все большее внимание уделяется развитию рециклинга углеродных волокон. В настоящее время только 2% извлеченных углеродных волокон используются повторно, что связано с ухудшением механических свойств волокон в процессе рециклинга [9]. Для улучшения характеристик извлекаемого волокна необходимо совершенствование и оптимизация технологии извлечения.

Существуют три основные категории переработки полимерных композиционных материалов (ПКМ): механическая, термическая и химическая [10, 11]. По отношению к качеству получаемого

вторичного сырья методы утилизации можно разделить на методы с низким уровнем извлечения углеродных волокон (механические методы) и высоким уровнем (термические и химические методы) [12].

В последнее время повышенный интерес к химическим методам извлечения углеродного волокна, в частности, к низкотемпературному сольволизу, обусловлен не только вследствие меньших затрат энергии, но и благодаря возможности вторичного использования как углеродных волокон, так и продуктов распада полимерного связующего. Так, в отличие от пиролиза, извлечение углеродного волокна сольволизом протекает при более низких температурах, что положительно влияет на качество получаемого наполнителя [13-14].

Для достижения полной деполимеризации матрицы методом низкотемпературного сольволиза в основном используются сильные кислотные или окисляющие среды [15-18], которые способствуют ослаблению связей молекул полимерной матрицы и ее последующей деструкции [19].

Несмотря на преимущества данного метода, одним из основных лимитирующих факторов его использования является сложность понимания химических процессов в сольволизном растворе [19]. В частности, актуальным вопросом является селективность реакционных систем (тип окислителя, концентрации кислот и т.д.) для того или иного типа углепластика, поскольку структура поверхности самого волокна, а также тип полимерной матрицы непосредственно может влиять на процесс диффузии, а, следовательно, на скорость разложения и качество получаемого рециклата [20-23].

Таким образом, целью нашей работы является оценка качества извлеченного углеродного волокна, полученного методом низкотемпературного сольволиза, в зависимости от типа углеродного волокна исходного полимерного композита.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методом вакуумной инфузии были изготовлены следующие образцы углепластиков: углеродная ткань твил С-163 с поверхностной плотностью 160 г/м² из углеродной нити Тогау 3К, 200 текс (Kordcarbon, Германия) – **vCF₁**; углеродная ткань твил 2/2 3К-1200-240 с поверхностной плотностью 240 г/м² из углеродной нити Тохо Тенах 3К, 200 текс (Toho Tenax, Германия) – **vCF₂**, система эпоксидная смола L/отвердитель GL2 (R&G, Германия), соотношение смола/отвердитель – 100:30, вязкость смеси 248 мПа·с при 25 °С; эпоксидная смола KER 828 (Kumho P&B Chemicals, Корея), вязкость 12~14 Па·с при 25 °С, отвердитель Этал-45М (ЗАО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ», Россия), соотношение смола/отвердитель – 2:1. Время вакуумирования образцов составляло 1 ч, размер композитов – 10×10 см. Марки углеткани были выбраны с учетом морфологических различий УВ и плотности плетения.

Для приготовления сольволизного раствора использовались: пероксид водорода 50%, х.ч. (ООО «Русхимтрейд»), серная кислота 60% х.ч. (ООО «АО РЕАХИМ») дистиллированная вода в соотношении 3:2,5:1. В полученный раствор объемом 200 мл помещался образец в виде пластин размером 1×1 см в количестве 10 шт. и выдерживался в течение 1 ч с заменой раствора каждые 20 мин. После полного извлечения волокно фильтровали, промывали дистиллированной водой до нейтральной pH и сушили при 100 °С в течение 15 ч. В результате были получены извлеченные углеродные волокна из следующих углепластиков с соответствующими обозначениями: rCF₁/KER, rCF₁/L, rCF₂/KER, rCF₂/L.

Визуальная оценка поверхности волокон произведена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) FEI Quanta 650FEG (FEI, США). Съемка происходила в режиме SE при высоком вакууме, рабочей дистанции ~ 11 мм и увеличении 5000 раз.

Исследование термического поведения образцов углеродных волокон и смол проведено методом синхронного термического анализа на термоанализаторе TGA/DSC 1 (Mettler Toledo) в температурном интервале 25-1000 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в атмосфере воздуха. Держатель образца – тигель из оксида алюминия, объемом 70 мкл. Навески всех образцов волокон составляли 18,3 мг.

Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) при использовании CuK α -излучения ($\lambda_{\text{ср}} = 1,54184 \text{ \AA}$). Сканирование проводилось в угловом интервале $2\Theta = 1,4^\circ - 80^\circ$ с шагом $0,01^\circ - 0,005^\circ$, время накопления сигнала 1,5-2 с при комнатной температуре.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) получали на спектрометре SENTERRA (Bruker, Германия) в диапазоне 100-4000 см⁻¹ с длиной волны излучения 532 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования углеродные волокна обеих марок были извлечены из разных эпоксидных систем, отличающихся вязкостью и термостойкостью [24]. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) была исследована поверхность исходных и извлеченных волокон (рис. 1).

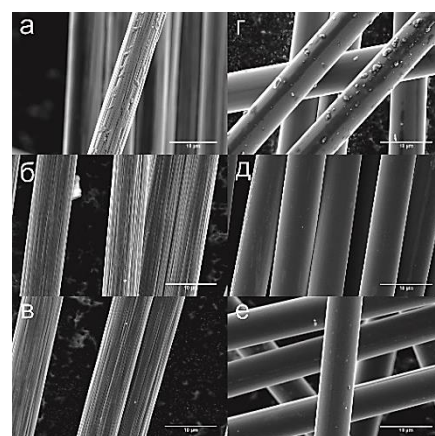


Рис. 1 СЭМ изображения исходных волокон **vCF₁** и **vCF₂** (рис. а, г), волокна **rCF₁**, извлеченные из смол KER и L (б, в), волокна **rCF₂**, извлеченные из смол KER и L (д, е)
Fig. 1. SEM images of origin **vCF₁** and **vCF₂** (a, g), **rCF₁** recycled from KER 828 and L epoxy resins (б, в), **rCF₂** recycled from KER 828 and L epoxy resins (д, е)

На рис. 1а и 1г представлены исходные волокна vCF₁ и vCF₂. Как видно из представленных изображений, исходные волокна покрыты аппретом, при этом можно отметить морфологические различия поверхности углеродных волокон. Волокна vCF₁ имеют выраженное фибриллярное строение, где каждое моноволокно состоит из параллельно направленных фибрилл диаметром ~150-200 нм, а волокна vCF₂, напротив, имеют гладкую структуру. Диаметр волокон обеих марок составляет ~7мкм. Визуальная оценка извлеченных волокон rCF₁ и rCF₂ показала, что вне зависимости от типа углеткани и полимерной системы на поверхности УВ практически не наблюдается остатков полимерного связующего, что указывает на эффективность данного метода извлечения.

Спектры комбинационного рассеяния образцов исходных vCF₁ и vCF₂ и извлеченных углеродных волокон представлены на рис. 2. Анализ аппроксимации кривой Лоренца был использован для вычисления соотношения интегральных интенсивностей D и G мод (I_D/I_G) для всех образцов УВ, результаты представлены в табл. 1.

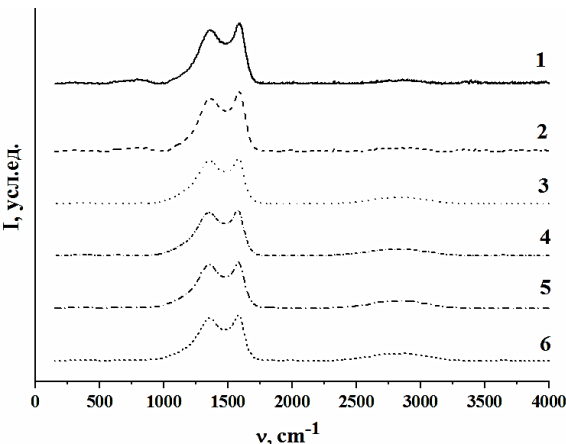


Рис. 2. КР-спектры углеродных волокон: 1 - vCF₁, 2 - vCF₂, 3 - rCF₁/KER, 4 - rCF₁/L, 5 - rCF₂/KER, 6 - rCF₂/L
Fig. 2. Raman spectra of carbon fibers: 1 - vCF₁, 2 - vCF₂, 3 - rCF₁/KER, 4 - rCF₁/L, 5 - rCF₂/KER, 6 - rCF₂/L

Таблица 1
Соотношение интегральных интенсивностей D и G мод (I_D/I_G)
Table 1. Ratio of integral intensities of D and G modes (I_D/I_G)

Образец	I_D/I_G
vCF ₁	2,21
rCF ₁ /KER	2,69
rCF ₁ /L	2,61
vCF ₂	2,00
rCF ₂ /KER	2,36
rCF ₂ /L	2,56

Соотношение I_D/I_G позволяет косвенно оценить степень дефектности структуры [25]. Из данных в приведенной таблице мы видим, что в процессе сольволиза в обоих случаях происходит увеличение соотношения I_D/I_G , что является следствием окислительных процессов, происходящих на поверхности углеродных волокон. Большей степенью графитизации обладает волокно vCF₂, при этом извлеченные волокна данной марки показали больший разброс значений I_D/I_G , чем образцы vCF₁. Для всех извлеченных волокон соотношение I_D/I_G относительно исходных УВ увеличивается ~ в 1,2 раза, что может говорить об одинаковой эффективности извлечения вне зависимости от типа углеродного волокна и эпоксидной матрицы.

Методом РФА оценена кристалличность исходных и извлеченных углеродных волокон. Наиболее значимыми пиками при исследовании углеродных волокон являются пики (002) и (100), согласно [26, 27]. В диапазоне 10-80° регистрируется возмущение (во всех шести образцах) (рис. 3). Для всех образцов наблюдаются два широких пика при низких углах дифракции, которые соответствуют углам дифракции 2θ при 25,5-26,5° и 36-43,30° и относятся к плоскости (002) и плоскости (100) (внахлест 100 и 101) неупорядоченной укладки микрографита соответственно [27]. Рассчитанные значения структурных параметров представлены в табл. 2.

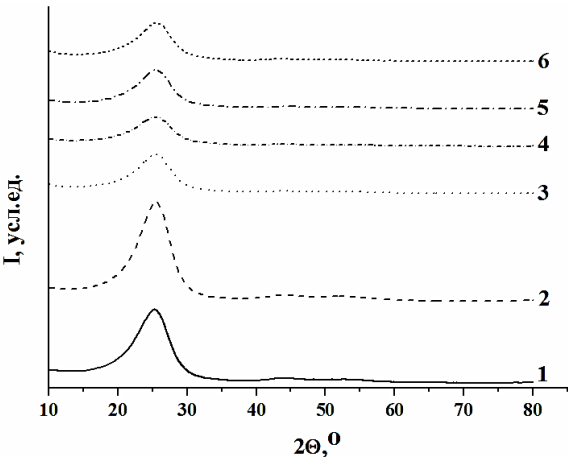


Рис. 3. Рентгеновская дифракция исходных и извлеченных углеродных волокон: 1 - vCF₁, 2 - vCF₂, 3 - rCF₁/KER, 4 - rCF₁/L, 5 - rCF₂/KER, 6 - rCF₂/L
Fig. 3. XRD of origin and reclaimed carbon fibers: 1 - vCF₁, 2 - vCF₂, 3 - rCF₁/KER, 4 - rCF₁/L, 5 - rCF₂/KER, 6 - rCF₂/L

Как видно из представленных результатов увеличение ширины на полувысоте (FWHM) и, соответственно, уменьшение толщины (L_c) и поперечного размера (L_a) кристаллита не зависят от

типа УВ и полимерного связующего. Такой характер изменений связан, скорее всего, с переходом графитовой фазы в аморфный углерод, что также подтверждается данными КР-спектроскопии.

Результаты исследования термоокислительной стабильности образцов исходных и извлеченных углеродных волокон представлены в табл. 3, где S – стадия процесса, T_1 , T_2 , T_3 – температуры (°C) потери массы при 5, 10 и 50% соответственно, R_1 и R_2 – процентный остаток потери массы при 600 °C и 800 °C, Q – величина теплового эффекта (кДж/г). Механизм термоокисления углеродных волокон

зависит от их структуры. Наличие у углеродных волокон фибриллярного строения и межфибриллярных пор способствует внутриволокнутому протеканию реакции окисления, сопровождающейся значительным локальным выделением тепла и реализацией цепного процесса [28]. Особенности процесса термоокисления извлеченных углеродных волокон могут свидетельствовать об образовании на поверхности углеродных волокон в процессе их сольволиза функциональных групп, способных взаимодействовать с реакционноспособной газовой средой (кислородом воздуха) при повышенной температуре.

Таблица 2

Результаты рентгенофазового анализа исходных и извлеченных углеродных волокон

Table 2. XRD results of origin and reclaimed carbon fibers

Образец	θ (°)		d (nm)		FWHM (°)		L _c (nm)	L _a (nm)
	002	100	002	100	002	100	002	100
vCF ₁	12,69	22,10	0,351	0,205	5,42	4,05	1,50	2,10
rCF ₁ /KER	12,66	22,15	0,351	0,204	5,78	4,30	1,42	1,99
rCF ₁ /L	12,59	21,93	0,353	0,206	5,86	4,31	1,39	1,99
vCF ₂	12,82	22,08	0,347	0,205	5,16	3,90	1,58	2,19
rCF ₂ /KER	12,82	21,66	0,347	0,209	5,47	4,43	1,49	1,94
rCF ₂ /L	12,76	21,94	0,4	0,206	5,42	4,45	1,51	1,92

Таблица 3

Термические показатели образцов углеродных волокон и эпоксидных смол

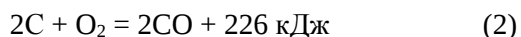
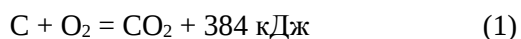
Table 3. Thermal parameters for carbon fiber and epoxy resin samples

Состав	S	ТГ					ДТГ	ДСК	
		T ₁	T ₂	T ₃	R ₁	R ₂	T _{max} , °C	T _{max} , °C	Q
vCF ₁	1	620	656	744	96,3	14,6	756	756	12,45
rCF ₁ /KER	1	622	654	729	96,8	1,4	750	750	17,39
rCF ₁ /L	1	626	659	749	96,8	6,9	785	784	16,70
vCF ₂	1	650	679	787	98,1	43,4	774	771	10,96
rCF ₂ /KER	1	602	638	728	95,2	0,3	750	757	16,52
rCF ₂ /L	1	617	648	728	96,5	2,5	755	756	16,86
L	1	320	333	365	0,36	0	339	361	0,40
	2						544	539	4,18
KER	1	224	284	408	1,8	0	283	-	-
	2						384	382	-0,11
	3						557	557	5,98

Из приведенных результатов видно, что окисление всех образцов углеродных волокон происходит в одну стадию, в то время как смолы L и KER828 разлагаются в две и три стадии соответственно. Основная потеря массы всех образцов извлеченного волокна происходит при температуре выше 600 °C. Как видно, из исходных волокон большей термостойкостью обладает волокно с более гладкой поверхностью vCF₂, что может быть связано с большей степенью графитизации [29]. При этом извлеченные волокна этой же марки оказались менее термостойкими. Так, в диапазоне 600-

800 °C происходит практически полное выгорание rCF₂/KER и rCF₂/L в отличие от исходного vCF₂. Для волокна с ярко выраженной фибриллярной структурой vCF₁ не происходит столь заметного изменения термоокислительных свойств после извлечения углеродных волокон методом сольволиза. Вероятной причиной таких отличий может служить плотность плетения углеткани и структура поверхности, которые непосредственно влияют на пропитку полимерным связующим в процессе инфузии.

Процесс окисления углеродных материалов может идти несколькими путями [28]:



Суммарный тепловой эффект термоокислительной деструкции для образцов извлеченных волокон превышает суммарный тепловой эффект деструкции исходного апропретированного волокна, что может свидетельствовать об изменении кинетики процесса окисления и уровня тепловыделения вследствие изменения структуры поверхности УВ, что подтверждается данными КР спектроскопии и РФА [30]. Интересно, что тепловой эффект извлеченных волокон rCF_1 сопоставим со значениями извлеченных rCF_2 , несмотря на различия в степени графитизации и морфологии поверхности [28], что требует дополнительных исследований.

Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что метод низкотемпературного сольволиза является низкоселективным по отношению к типам отходов углепластика из эпоксидных смол разных марок, что позволяет перерабатывать углепластики из различных типов смол. Совместные данные КР спектроскопии и РФА показали, что вне зависимости от типа полимерного связующего извлеченные волокна показывают сопоставимые с исходными волокнами структурные характеристики, что указывает на минимальную степень химической деструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом низкотемпературного сольволиза были получены извлеченные волокна из разных уг-

лепластиков. Результаты термических исследований показали, что наибольшей термоокислительной стабильностью обладают извлеченные волокна марки vCF_1 . Результаты рентгенофазового анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния показали снижение степени графитизации и уменьшение размеров кристаллита, что является следствием химической обработки волокон. При этом, полученные структурные характеристики извлеченных углеродных волокон сопоставимы с характеристиками исходных волокон, что позволяет говорить о методе низкотемпературного сольволиза как эффективном способе извлечения углеродных волокон.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации 124022100088-6 и при финансовой поддержке гранта при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края в рамках научного проекта № 19-43-590024 p_a.

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

The research was carried out within the state assignment of the Russian Federation (No. 124022100088-6). The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research and Perm Territory as part of a scientific project no. 19-43-590024 p_a.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Smith M.** New developments in carbon fiber. *Reinf. Plast.* 2021. V. 62. N 5. P. 266-269. DOI: 10.1016/j.repl.2017.07.004.
2. **Karnik S.R., Gaitonde V.N., Campos Rubio J., Esteves Correia A., Abrão A.M., Paulo Davim J.** Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Mater. Des.* 2008. V. 29. N 9. P. 1768-1776. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.03.014.
3. **Zabini O., Ahmadi M., Liu Ch., Mahmoodi R., Li Q., Naebe M.** Development of a low cost and green microwave assisted approach towards the circular carbon fibre composites. *Compos. B: Eng.* 2020. V. 184. 107750. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107750.
4. **Khayyam H. Jazar R.N., Nunna S., Golkarnarenji G., Badii K., Fakhrhoseini S.M., Kumar S., Naebe M.** PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modeling. *Prog. Mater. Sci.* 2020. V. 107. 100575. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100575.
5. **Заритовский А.Н., Котенко Е.Н., Гришук С.В., Глазунова В.А., Волкова Г.К.** Графиты и графитоподобные

REFERENCES

1. **Smith M.** New developments in carbon fiber. *Reinf. Plast.* 2021. V. 62. N 5. P. 266-269. DOI: 10.1016/j.repl.2017.07.004.
2. **Karnik S.R., Gaitonde V.N., Campos Rubio J., Esteves Correia A., Abrão A.M., Paulo Davim J.** Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Mater. Des.* 2008. V. 29. N 9. P. 1768-1776. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.03.014.
3. **Zabini O., Ahmadi M., Liu Ch., Mahmoodi R., Li Q., Naebe M.** Development of a low cost and green microwave assisted approach towards the circular carbon fibre composites. *Compos. B: Eng.* 2020. V. 184. 107750. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107750.
4. **Khayyam H. Jazar R.N., Nunna S., Golkarnarenji G., Badii K., Fakhrhoseini S.M., Kumar S., Naebe M.** PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modeling. *Prog. Mater. Sci.* 2020. V. 107. 100575. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100575.
5. **Zaritovskii A.N., Kotenko E.N., Grishchuk S.V., Glazunova V.A., Volkova G.K.** Graphites and graphite-like materials as microwave acceptors in the synthesis of carbon

- материалы в качестве микроволновых акцепторов в процессах синтеза углеродных наноструктур. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 64-75. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7098.
- Verma S., Balasubramaniam B., Gupta R.K. Recycling, reclamation and re-manufacturing of carbon fibres. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2018. V. 13. P. 86-90. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.05.011.
 - Шутова Ю.С., Ухин К.О., Слободинюк Д.Г., Кисельков Д.М., Слободинюк А.И. Низковязкое эпоксидное связующее. *Химия. Экология. Урбанистика*. 2024. Т. 2. С. 141-144.
 - Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Роговина С.З., Берлин А.А., Фахреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е. Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
 - Taylor J.H. Troisi G., Soltani S.M. Application of chemically-activated recycled carbon fibres for aqueous-phase adsorptions - part I: Optimisation of activation process. *Chem. Eng. J. Adv.* 2024. V. 18. P. 100591. DOI: 10.1016/j.ceja.2024.100591.
 - Лебедева Е.А., Астафьева С.А., Истомина Т.С., Трухинов Д.К., Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н. Применение низкотемпературного сольволиза для переработки армированных углепластиков. *ЖИХ*. 2020. Т. 93. Вып. 6. С. 834-843. DOI: 10.31857/S0044461820060092.
 - Клячкин Ю.С., Терешатов В.В., Вальцифер В.А., Сеичев В.Ю., Иманкулова С.А. Создание низкотемпературного способа вторичной переработки шитых полиуретанов. *ЖИХ*. 1997. Т. 70. Вып. 10. С. 1757-1758.
 - Hagnell M.K., Åkermo M. The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 223. N 20. P. 957-968. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.156.
 - Christelle Morin C., Loppinet-Serani A., Cansell F., Aymonier C. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *J. Supercrit. Fluids*. 2012. V. 66. P. 232-240. DOI: 10.1016/j.supflu.2012.02.001.
 - Pimenta S., Pinho S.T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *J. Waste Manag.* 2011. V. 31. N 2. P. 378-392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.
 - Ma Y., Kim D., Nutt S.R. Chemical treatment for dissolution of amine-cured epoxies at atmospheric pressure. *Polym. Degrad. Stab.* 2017. V. 146. P. 240-249. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.10.014.
 - Xu P., Li J., Ding J. Chemical recycling of carbon fibre/epoxy composites in a mixed solution of peroxide hydrogen and N,N-dimethylformamide. *Compos. Sci. Technol.* 2013. V. 82. N 18. P. 54-59. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.04.002.
 - Feraboli P., Kawakami H., Wade B., Gasco F., DeOto L., Masini A. Recyclability and reutilization of carbon fiber fabric/epoxy composites. *J. Compos. Mater.* 2011. V. 46. N 12. P. 1459-1473. DOI: 10.1177/0021998311420604.
 - Li J., Xu P., Zhu Y., Ding J., Xue L., Wang Y. A promising strategy for chemical recycling of carbon fiber/thermoset nanostructures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 3. P. 64-75. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7098.
 - Verma S., Balasubramaniam B., Gupta R.K. Recycling, reclamation and re-manufacturing of carbon fibres. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2018. V. 13. P. 86-90. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.05.011.
 - Shutova Yu.S., Ukhin K.O., Slobodinyuk D.G., Kisel'kov D.M., Slobodinyuk A.I. Low viscosity epoxy binder. *Khimia. Ekologia. Urbanistika*. 2024. V. 2. P. 141-144 (in Russian).
 - Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.H., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantsev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zaniin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials. structure, properties, application prospects. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 9. P. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.
 - Taylor J.H. Troisi G., Soltani S.M. Application of chemically-activated recycled carbon fibres for aqueous-phase adsorptions - part I: Optimisation of activation process. *Chem. Eng. J. Adv.* 2024. V. 18. P. 100591. DOI: 10.1016/j.ceja.2024.100591.
 - Lebedeva E.A., Astaf'eva S.A., Istomina T.S., Trukhinov D.K., Il'inykh G.V., Slyusar N.N. Application of Low-Temperature Solvolysis for Processing of Reinforced Carbon Plastics. *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. V. 93. P. 845-853. DOI: 10.1134/S1070427220060117.
 - Klyachkin Yu.S., Tereshatov V.V., Val'tsifer V.A., Senivhev V.Yu., Imankulova S.A. Low-temperature secondary reprocessing of cross-linked polyurethanes. *Russ. J. Appl. Chem.* 1997. V. 70. N 10. P. 1672-1673.
 - Hagnell M.K., Åkermo M. The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 223. N 20. P. 957-968. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.156.
 - Christelle Morin C., Loppinet-Serani A., Cansell F., Aymonier C. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *J. Supercrit. Fluids*. 2012. V. 66. P. 232-240. DOI: 10.1016/j.supflu.2012.02.001.
 - Pimenta S., Pinho S.T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *J. Waste Manag.* 2011. V. 31. N 2. P. 378-392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.
 - Ma Y., Kim D., Nutt S.R. Chemical treatment for dissolution of amine-cured epoxies at atmospheric pressure. *Polym. Degrad. Stab.* 2017. V. 146. P. 240-249. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.10.014.
 - Xu P., Li J., Ding J. Chemical recycling of carbon fibre/epoxy composites in a mixed solution of peroxide hydrogen and N,N-dimethylformamide. *Compos. Sci. Technol.* 2013. V. 82. N 18. P. 54-59. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.04.002.
 - Feraboli P., Kawakami H., Wade B., Gasco F., DeOto L., Masini A. Recyclability and reutilization of carbon fiber fabric/epoxy composites. *J. Compos. Mater.* 2011. V. 46. N 12. P. 1459-1473. DOI: 10.1177/0021998311420604.
 - Li J., Xu P., Zhu Y., Ding J., Xue L., Wang Y. A promising strategy for chemical recycling of carbon fiber/thermoset composites: Self-accelerating decomposition in a mild oxidative system. *Green Chem.* 2012. V. 14. N 12. P. 3260-3263. DOI: 10.1039/C2GC36294E.

- composites: Self-accelerating decomposition in a mild oxidative system. *Green Chem.* 2012. V. 14. N 12. P. 3260-3263. DOI: 10.1039/C2GC36294E.
19. Шайдунова Г.И., Шевяков Я.С., Васильев И.Л., Гатина Е.Р., Куликова Ю.В. Оценка возможности утилизации углепластиков химическим методом. *Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнол.* 2018. Т. 8. Вып. 3. С. 135-140. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-135-140.
20. Wang Y., Cui X., Ge H., Yang Y., Wang Y., Zhang C., Li J., Deng T., Qin Z., Hou X. Chemical Recycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites via Selective Cleavage of the Carbon–Nitrogen Bond. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2015. V. 3. N 12. P. 3332-3337. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00949.
21. Ma Y., Nutt S. Chemical treatment for recycling of amine/epoxy composites at atmospheric pressure. *Polym. Degrad. Stab.* 2018. V. 153. P. 307-317. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.011.
22. Navarro C.A., Kedzie E.A., Ma Y., Michael K.H., Nutt S.R., Williams T. Mechanism and Catalysis of Oxidative Degradation of Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Top. Catal.* 2018. V. 61. P. 704-709. DOI: 10.1007/s11244-018-0917-2.
23. Zhou J.L., Cheng C., Zhang H., Sun Z.Y., Zhu S., Yu M.H. Dissolution behaviour of polyethersulfone in diglycidyl ether of bisphenol-A epoxy resins. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. V. 213. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/213/1/012038.
24. Strel'nikov V.N., Senichev V.Y., Slobodinyuk A.I., Savchuk A.V., Volkova E.R., Makarova M.A., Nechaev A.I., Krasnosel'skikh S.F., Ukhin K.O. Preparation and Properties of Frost-Resistant Room-Temperature-Curable Compounds Based on Oligoethertetraurethane Diepoxides of Various Chemical Structures. *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 3. P. 463-468. DOI: 10.1134/S1070427218030199.
25. Zhang B., Chen T. Study of Ultrasonic Dispersion of Graphene Nanoplatelets. *Materials.* 2019. V. 12. N 11. DOI: 10.3390/ma12111757.
26. Srisuriyachot J., McNair S.A.M., Chen Y., Barthelay T., Gray R., Bénézech J., Dolbnya I.P., Butler R., Lunt A.J.G. Carbon fibre lattice strain mapping via microfocus synchrotron X-ray diffraction of a reinforced composite. *Carbon.* 2022. V. 200. N 5. P. 347-360. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.08.041.
27. Ryu Z., Rong H., Zheng J., Wang M., Zhang B. Microstructure and chemical analysis of PAN-based activated carbon fibers prepared by different activation methods. *Carbon.* 2002. V. 40. N 7. P. 1144-1147. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00105-7.
28. Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению. *Тр. ВИАМ.* 2022. Т. 7. Вып. 113. С. 63-73. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
29. Хабибуллина И.А., Ситников Н.Н., Казаков В.А., Сигалаев С.К. Синхронный термический анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света как взаимодополняющие методы диагностики аллотропных форм углерода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 8. С. 3439. DOI: 10.6060/tcct.20165908.35y.
30. Govorov A.V., Galiguzov A.A., Tikhonov N.A., Malakhov A.P., Rogozin A.D. Study of Different Types of Carbon Fiber Oxidation Kinetics. *Refract. Ind. Ceram.* 2016. V. 56. P. 605-609. DOI: 10.1007/s11148-016-9897-6.
19. Shaydurova G.I., Shevyakov Ya.S., Vasiliev I.L., Gatina E.R., Kulikova Yu.V. Assessment of the possibility of carbon fiber composite recycling using chemical methods. *Izv. Vuzov. Priklad. Khimiya Biotekhnol.* 2018. V. 8. N 3. P. 135-140 (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-135-140.
20. Wang Y., Cui X., Ge H., Yang Y., Wang Y., Zhang C., Li J., Deng T., Qin Z., Hou X. Chemical Recycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites via Selective Cleavage of the Carbon–Nitrogen Bond. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2015. V. 3. N 12. P. 3332-3337. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00949.
21. Ma Y., Nutt S. Chemical treatment for recycling of amine/epoxy composites at atmospheric pressure. *Polym. Degrad. Stab.* 2018. V. 153. P. 307-317. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.011.
22. Navarro C.A., Kedzie E.A., Ma Y., Michael K.H., Nutt S.R., Williams T. Mechanism and Catalysis of Oxidative Degradation of Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Top. Catal.* 2018. V. 61. P. 704-709. DOI: 10.1007/s11244-018-0917-2.
23. Zhou J.L., Cheng C., Zhang H., Sun Z.Y., Zhu S., Yu M.H. Dissolution behaviour of polyethersulfone in diglycidyl ether of bisphenol-A epoxy resins. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. V. 213. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/213/1/012038.
24. Strel'nikov V.N., Senichev V.Y., Slobodinyuk A.I., Savchuk A.V., Volkova E.R., Makarova M.A., Nechaev A.I., Krasnosel'skikh S.F., Ukhin K.O. Preparation and Properties of Frost-Resistant Room-Temperature-Curable Compounds Based on Oligoethertetraurethane Diepoxides of Various Chemical Structures. *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 3. P. 463-468. DOI: 10.1134/S1070427218030199.
25. Zhang B., Chen T. Study of Ultrasonic Dispersion of Graphene Nanoplatelets. *Materials.* 2019. V. 12. N 11. DOI: 10.3390/ma12111757.
26. Srisuriyachot J., McNair S.A.M., Chen Y., Barthelay T., Gray R., Bénézech J., Dolbnya I.P., Butler R., Lunt A.J.G. Carbon fibre lattice strain mapping via microfocus synchrotron X-ray diffraction of a reinforced composite. *Carbon.* 2022. V. 200. N 5. P. 347-360. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.08.041.
27. Ryu Z., Rong H., Zheng J., Wang M., Zhang B. Microstructure and chemical analysis of PAN-based activated carbon fibers prepared by different activation methods. *Carbon.* 2002. V. 40. N 7. P. 1144-1147. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00105-7.
28. Sidorina A.I., Safronov A.M. Study of the resistance of carbon fibers to oxidation. *Tr. VIAM.* 2022. V. 7. N 113. P. 63-73 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
29. Khabibullina I.A., Sitnikov N.N., Kazakov V.A., Sigalaev S.K. Simultaneous thermal analysis and raman spectroscopy as complementary methods of diagnostics of carbon allotropic forms. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2016. V. 59. N 8. P. 34-39. DOI: 10.6060/tcct.20165908.35y.
30. Govorov A.V., Galiguzov A.A., Tikhonov N.A., Malakhov A.P., Rogozin A.D. Study of Different Types of Carbon Fiber Oxidation Kinetics. *Refract. Ind. Ceram.* 2016. V. 56. P. 605-609. DOI: 10.1007/s11148-016-9897-6.

Поступила в редакцию (Received) 03.10.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 02.12.2024