

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 537.9

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.008

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЫ НА ГОТОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ЧИСТЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ И СМОЛ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФИТОМ

Мария Васильевна Солонинкина¹, Дмитрий Владимирович Логинов²

^{1,2} Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

¹ Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия

¹ mas31393@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3261-1960>

² logindm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3255-2603>

Аннотация. Исследование направлено на разработку новых композиционных материалов на основе фотополимерных смол, модифицированных микродисперсным графитовым наполнителем, с целью повышения химической устойчивости к агрессивной щелочной среде. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания химически стойких фотополимерных смол к щелочной среде для использования в машиностроении, в частности, при производстве строительных 3D-принтеров, печатающих бетоном. Приведены результаты создания графитового наполнителя для модификации фотополимерных смол марок SUNLU ABS-Like (Китай), HARZ Labs Industrial Nylon-Like (Россия) и HARZ Labs Industrial Rigid (Россия), полученного с использованием шаровой планетарной мельницы. Приведен анализ структуры подготовленного графитового наполнителя, включающий рентгеноструктурный анализ и растровую электронную микроскопию. Описаны процессы создания модифицированных фотополимерных смол и оценка влияния наполнителя на химическую устойчивость смол к щелочной среде методом контакта образцов с щелочной средой. В результате исследования установлено, что размеры частиц графитового наполнителя варьировались от 10 до 40 мкм, а анализ структуры показал, что он близок к характеристикам гексагонального графита. Кроме того, результаты анализа образцов фотополимерных смол, содержащие 10% графита от массы смолы, свидетельствуют о том, что они демонстрируют наибольшую устойчивость к воздействию щелочной среды по сравнению с чистыми фотополимерными смолами.

Ключевые слова. фотополимерная смола, композит, графит, рентгеновская дифракция, растровая электронная микроскопия, щелочная среда, аддитивные технологии

Благодарности. Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта "Разработка способа упрочнения деталей строительных 3D-принтеров, изготовленных из фотополимерных смол", поддержанного в рамках Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, в 2024 году, финансируемой Правительством Республики Карелия (Договор №3-Г24 от 20.03.2024 между ФГБОУ ВО "Петрозаводский государственный университет" и Фондом венчурных инвестиций Республики Карелия).

Для цитирования: Солонинкина М.В., Логинов Д.В. Влияние щелочной среды на готовые изделия из чистых фотополимерных смол и смол, наполненных графитом // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 2. С. 201-209. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.008

Original article

THE INFLUENCE OF ALKALINE MEDIUM ON FINISHED PRODUCTS MADE OF PURE PHOTOPOLYMER RESINS AND RESINS FILLED WITH GRAPHITE**Maria V. Soloninkina¹, Dmitriy V. Loginov²**^{1,2} Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia¹ Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia¹mas31393@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3261-1960>²logindm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3255-2603>

Abstract. The research is aimed at developing new composite materials based on photopolymer resins modified with microdispersed graphite filler in order to increase chemical resistance to aggressive alkaline environment. The relevance of the work is due to the need to create chemically resistant photopolymer resins to an alkaline environment for use in mechanical engineering, in particular, in the production of construction 3D printers that print concrete. The results of the creation of a graphite filler for the modification of photopolymer resins of the brands SUNLU ABS-Like (China), HARZ Labs Industrial Nylon-Like (Russia) and HARZ Labs Industrial Rigid (Russia) obtained using a spherical planetary mill are presented. The analysis of the structure of the prepared graphite filler, including X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy, is presented. The processes of creating modified photopolymer resins and evaluating the effect of filler on the chemical resistance of resins to an alkaline medium by contacting samples with an alkaline medium are described. As a result of the study, it was found that the particle sizes of graphite filler ranged from 10 to 40 microns, and an analysis of the structure showed that it was close to the characteristics of hexagonal graphite. In addition, the results of the analysis of samples of photopolymer resins containing 10% graphite by weight of the resin indicate that they demonstrate the greatest resistance to the effects of an alkaline environment compared with pure photopolymer resins.

Keywords. photopolymer resin, composite, graphite, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, alkaline medium, additive technologies.

Acknowledgements. The research described in this paper was carried out within the framework of the project "Development of a method for strengthening parts of construction 3D printers made of photopolymer resins", supported under the R&D Support Program for students, postgraduates and persons with academic degrees who make a significant contribution to the innovative development of economic and social sectors of the Republic of Karelia in 2024. funded by the Government of the Republic of Karelia (Agreement No. 3-G24 dated 03/20/2024 between Petrozavodsk State University and the Venture Capital Fund of the Republic of Karelia).

For citation: Soloninkina M.V. & Loginov D.V. (2025). The influence of an alkaline medium on finished products made of pure photopolymer resins and resins filled with graphite. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(2), 201-209. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.008.

Введение

В XXI веке аддитивные технологии активно вошли в жизнь человека. Современные 3D-принтеры находят свое применение в различных сферах деятельности: от бытового использования до сложных производств и медицины [1-5]. Бытовое использование 3D-принтеров в эпоху индустрии уступает интересу к их роли в промышленных производственных процессах. Аддитивные технологии позволяют создавать детали практически любой геометрии, сокращая временные затраты и увеличивая производительность изделий. Кроме того, на рынке представлен широкий выбор материалов для производства конечных изделий с различными

показателями прочности и качества, к которым относятся и магнитные материалы, и полимерные, и даже цемент [6-8]. Одной из распространенных технологий 3D-печати в промышленности является SLA-технология, для которой в качестве исходного материала используется фотополимерная смола, обладающая уникальными свойствами, которые обеспечивают ей высочайшую прочность.

На рынке представлено широкое разнообразие фотополимерных смол с набором различных физико-химических свойств, что позволяет выбирать фотополимерную смолу в соответствии с конкретной поставленной технической задачей [9]. Однако следует учитывать, что в зависимости от метода печати, соблюдения ре-

комендаций производителя по использованию и печати конечных изделий из фотополимерных смол, условий на предприятии (температуры, влажности, наличие пыли в воздухе и т.д.), характеристики конечных изделий могут отличаться от технических требований, предъявляемыми к конечному изделию на конкретном предприятии.

Помимо этого, физико-химические характеристики фотополимеров могут изменяться под воздействием ряда внешних факторов, в которых они будут использоваться, одним из которых является щелочная среда. Компания ООО «Лерто» [10], по заявке которой осуществлялось выполнение гранта, производит строительные 3D-принтеры для печати бетоном, детали которого изготавливаются из фотополимерных смол подверженные быстрому износу. Бетон приобретает щелочность с водородным показателем pH равным 13, когда цемент и вода вступают в реакцию. Известно, что щелочные растворы, такие как гидроксид натрия (NaOH) или калия (KOH), способны вызывать различные химические реакции с компонентами фотополимерных смол [11]. Основное влияние заключается в гидролизе полимерной цепи, что может приводить к разрыву связей и снижению механической прочности изделия. В дополнение к изменению механических свойств, щелочная среда также способна оказывать негативное воздействие на поверхность изделий. На ней могут образовываться трещины и другие дефекты, существенно сокращающие срок службы готовых продуктов.

Это, в свою очередь, подчеркивает необходимость исследования новых материалов и методов модификации свойств уже существующих материалов.

В работе проведены исследования устойчивости к щелочной среде доступных на рынке фотополимерных смол, представленных в таблице 1, из категории «инженерные», используемые для создания конечных изделий и обладающие улучшенными характеристиками, в частности, химической стойкостью к органическим растворителям. Задачи, поставленные при исследовании, заключаются в проведении эксперимента контакта образцов чистых фотополимерных смол с щелочной средой, подготовке графитового наполнителя для модификации фотополимерных смол, исследование его структуры методом рентгеновской дифракции и оценке размерности частиц с помощью раст-

ровой электронной микроскопии (РЭМ), а также создании композита модифицированной фотополимерной смолы наполнителем и исследование его на изменение устойчивости к щелочной среде.

Таблица 1 – Исследуемые образцы фотополимерных смол

№ образца	Торговое название	Страна производитель
1	SUNLU ABS-Like	Китай
2	HARZ Labs Industrial Nylon-Like	Россия
3	HARZ Labs Industrial Rigid	Россия
4	SUNLU ABS-Like с добавлением графита	
5	HARZ Labs Industrial Nylon-Like с добавлением графита	
6	HARZ Labs Industrial Rigid с добавлением графита	

Методика эксперимента. Создание графитового наполнителя для фотополимерных смол было выполнено на кафедре физики твердого тела Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ, Петрозаводск, Россия) с использованием планетарной мельницы марки PULVERISETTE 7 premium line.

Исследование рентгеноструктурных характеристик графита проводилось в Учебно-научной лаборатории рентгеноструктурного анализа и компьютерного моделирования Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ, Петрозаводск, Россия) на автоматизированном дифрактометре ДРОН-4 в MoK α -излучении ($\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$), монохроматизированном кристаллом пиролитического графита. Рентгеновские дифракционные картины снимались в автоматическом режиме в интервале углов рассеяния от 2 до 70°, с шагом 0.2°, и с 70 до 145° с шагом 0.5°, время экспозиции в каждой точке составило 10 секунд. Съёмки проводились в геометрии на просвет. Экспериментальные кривые распределения интенсивности рассеяния $I_{\text{изм}}(2\theta^\circ)$ усреднялись по 10 съёмкам. Затем, согласно методике, изложенной в работе 12, в экспериментальные кривые распределения интенсивности рассеяния $I(2\theta^\circ)$ были введены поправки на комптоновское рассеяние, поляризацию, поглощение и переведены в электрон-

ные единицы (эл. ед.) и рассчитывали парные функции $D(r)$, характеризующие распределение электронной плотности материала.

Из кривых распределения парных функций $D(r)$ для графитового наполнителя были рассчитаны радиусы координационных сфер r_{ij} их размытия σ_{ij} и координационные числа N_{ij} . Для расчета в первом приближении были приняты радиусы координационных сфер r_i , рассчитанные для гексагонального графита, который представляет собой изученную кристаллическую структуру с плотнейшей двухслойной гексагональной упаковкой [13].

Оценка размерности частиц подготовленного наполнителя проводилась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi Scanning Electron Microscope SU1510 в наноцентре Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ, Петрозаводск, Россия).

Печать образцов кубической формы чистых фотополимерных смол для исследования на устойчивость к щелочной среде осуществлялась на 3D-принтере марки Anycubic Photon S (Anycubic Light-cured) 1000. Принтер обладает следующими параметрами: скорость печати 10–20 мм/ч, длина волны ультрафиолетового излучения 405 нм, рабочая камера 115x65x165 мм, технология печати DLP/LCD, источник света УФ-LED, разрешение 2560*1440 dpi, толщина слоя от 10 мкм.

Создание композита модифицированной фотополимерной смолы с использованием порошкового графитового наполнителя осуществлялось в химическом стакане при комнатной температуре и перемешивалось до достижения однородной консистенции с помощью магнитной мешалки марки ТАГЛЕР ММ-135НМ, работающей на скорости 400 об/мин. Образцы кубической формы из модифицированной фотополимерной смолы со стороной размером 2 см были изготовлены с помощью 3D-печати на принтере BIQU Pixel L. Данный 3D-принтер обладает следующими параметрами: длина волны УФ 405 нм, источник света УФ-LED, рабочая камера 115x65x165 мм, разрешение печати 2560*1440 dpi, технология печати LCD, толщина слоя до 10 мкм, скорость печати 10-20 мм/ч.

Исследования образцов на устойчивость к химическим воздействиям (щелочная среда) проводились методом моделирования процесса контакта образцов с щелочной средой. Для этого образцы помещали в химический стакан

объемом 30 мл, при комнатной температуре, заполненный щелочной средой с водородным показателем pH равным 13. Во время проведения эксперимента осуществлялся визуальный контроль за изменением внешнего вида образцов с интервалом в 12 часов. По истечении 36 часов изделия извлекались, промывались водой и просушивались в течение 30 минут при комнатной температуре.

Результаты исследования и их обсуждения. Поскольку выбор наполнителя обусловлен конкретными требованиями к свойствам конечного продукта, а именно устойчивости к щелочной среде, наиболее оптимальным химически инертным наполнителем является графит. Это доступный материал, производимый и поставляемый российскими производителями, а также не требующий значительных затрат на оборудование. Кроме того, согласно информации управления недропользования Министерства природопользования и экологии Республики Карелия [13], в Карелии насчитывается одно крупное месторождений графита – Ихальское месторождение, при флотации которого содержание углерода достигает порядка 90% и отвечает требованиям государственных стандартов на графит.

Подготовленный графитовый наполнитель представлял собой темно-серый кристаллический порошок, обладающий слабым металлическим блеском и рыхлой структурой. Параметры процесса производства которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры приготовления графитового наполнителя для модификации фотополимерной смолы

Параметр	Количество	Продолжительность
Число циклов	20	10 минут
Пауза между циклами	9	1 минута
Реверс вращения	-	Да
Скорость вращения	-	500 об/мин
Размер молящих шаров	-	5 мм
Число шаров помола	-	50
Материал шаров помола	-	агат

Стоит отметить, что 3D-принтеры способны печатать с порошками мелкой фракции микронного размера. Соответственно, необходимо, чтобы частицы используемых порошков наполнителей соответствовали указанному диапазону. Оценка размеров полученных частиц в образце графитового наполнителя, проведенная с помощью РЭМ, показала, что размеры частиц варьировались от 5 мкм до 25 мкм (рис. 1), что является допустимыми размерами для применения в 3D-печати.

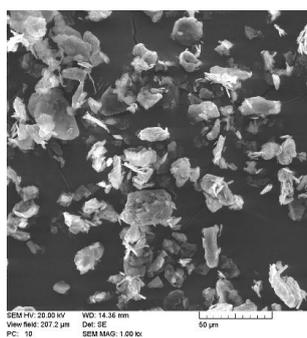


Рис. 1. РЭМ изображение графитового наполнителя

В ходе рентгенографического эксперимента была получена рентгенограмма образца графитового наполнителя (рис. 2, а), на которой наблюдается набор узких рефлексов. Присутствует максимум в области $2\theta = 12^\circ$, характерный для отражения (002) графита. Остальные положения основных максимумов также совпадают с аналогичными значениями для гексагонального графита, что указывает на упорядоченную структуру графитового наполнителя. Согласно литературным источникам [14], графит отличается высокой устойчивостью к воздействию агрессивных сред, в частности щелочи, когда взаимное расположение кристаллов графита характеризуется упорядоченной кристаллической структурой.

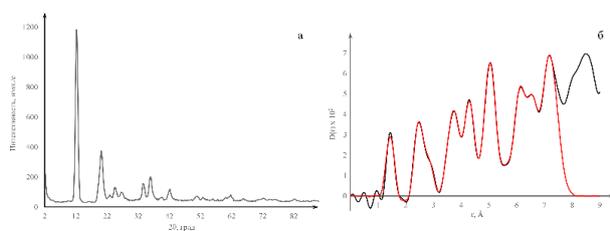


Рис. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа графитового наполнителя, где а – картина рассеяния $I(2\theta)$; б – кривые распределения парных функций $D(r)$

На рисунке 2 (б) представлены подбираемая парная функция распределения $D(r)$ и экспериментальная для исследуемого образца. Степень несоответствия подобранной $D_{\text{подоб}}(r)$ с экспериментальной кривой $D_{\text{экс}}(r)$ составила менее 6%. Полученные данные r_{ij} , N_{ij} , σ_{ij} сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Значения радиусов r_{ij} , размытий σ_{ij} координационных сфер и координационные числа N_{ij} для исследуемого графитового наполнителя

Графит Н			Графитовый наполнитель		
№ сф.	r_{ij} , Å	N_{ij} , ат.	r_{ij} , Å	σ_i , Å	N_i , ат.
1	1.42	3.0	1.44	0.00	2.7 ± 0.1
			1.99	0.00	4.2 ± 0.1
2	2.46	6.0	2.48	0.12	6.67 ± 0.2
3	2.84	3.0	2.87	0.00	2.82 ± 0.1
4	3.35	1.0	3.5	0.00	2.38 ± 0.1
5	3.68	15.0	3.75	0.15	11.43 ± 0.2
6	4.27	21.0	4.29	0.18	16.69 ± 0.4
7	5.01	30.0	5.04	0.21	29.98 ± 0.6
8	5.41	6.0	5.67	0.19	6.62 ± 0.1
9	5.67	3.0	5.83	0.10	3.15 ± 0.7

Из анализа таблицы следует, что радиусы размытий первых трех, шестой и седьмой сфер незначительно отличаются от соответствующих значений для гексагонального графита. Однако для четвертой и пятой сфер у графитового наполнителя наблюдается отклонение радиусов размытий от гексагонального графита в сторону больших значений. Координационные числа первой и пятой сфер графитового наполнителя чуть ниже, чем координационные числа для гексагонального графита указанных сфер. Это может быть обусловлено проявлением краевых условий и наличием точечных дефектов, представленных вакансиями. Со второго номера сферы до девятого, исключая пятый, наблюдается увеличение координационного числа, что может быть обусловлено присутствием обломков сеток или наличием свободных атомов углерода в межсеточном пространстве.

Введение наполнителя в фотополимерную смолу при высоких оборотах с использованием

магнитной мешалки позволяет достичь однородной суспензии без образования комков. Наблюдение за композитом в жидком состоянии в течение суток показало, что порошок не оседает, а остается во взвешенном состоянии в фотополимерной смоле, а цвет композита сохраняет свою однородность.

Опытные образцы кубической формы (2 x 2 см) были изготовлены на 3D-принтере для каждой модифицированной смолы с графитовым наполнителем. Кроме модифицированных смол, также были созданы образцы кубической формы (2 x 2 см), выполненные из чистых фотополимерных смол, используемых для создания композита, с целью анализа влияния введенного наполнителя на устойчивость к химическому воздействию (щелочной среды).

На рисунках 3 – 5 представлены фотографии образцов № 1 – 3 после воздействия на них щелочной среды. Для наглядности с помощью средств коррекции изображений красной линией выделена часть образца, которая помещалась в щелочную среду.

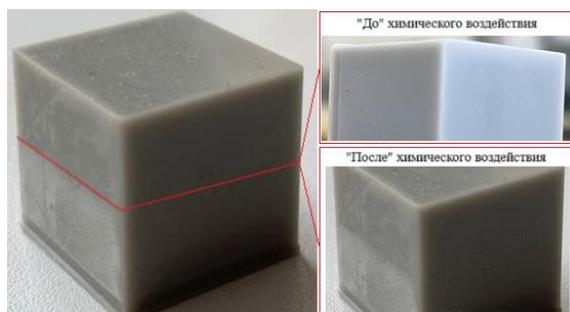


Рис. 3. Изготовленный опытный образец №1 кубической формы после воздействия щелочной среды с pH 13

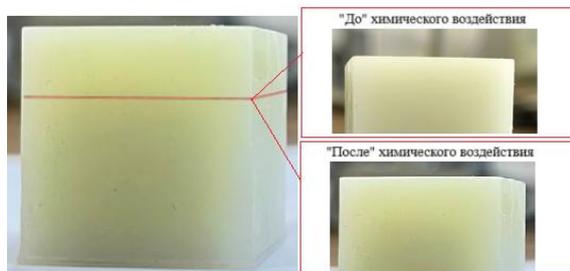


Рис. 4. Изготовленный опытный образец №2 кубической формы после воздействия щелочной среды с pH 13

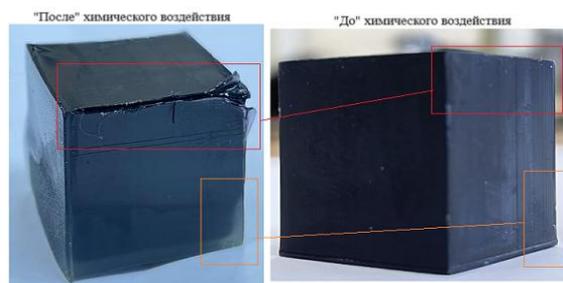


Рис. 5. Изготовленный опытный образец №3 кубической формы после воздействия щелочной среды с pH 13

У образцов №1 (рис. 3) и №2 (рис. 4) после воздействия щелочной среды на параллелепипедах просматривается четкая граница раздела двух сред, что свидетельствует об изменении поверхностного слоя. В результате этого поверхность образцов, погруженных в щелочь, становится гладкой. При визуальном контроле на поверхности опытных образцов, подвергнутых воздействию щелочной среды, не было обнаружено явных видимых повреждений. Также не произошло формоизменений элементов опытного образца: отсутствовали деформированные участки, коробление, то есть разнонаправленные выпучивания плоских частей конструкции, провисания и другие отклонения от первоначального состояния. Эти фотополимерные смолы проявили устойчивость к щелочной среде.

У образца №3 (рис. 5) в течение всего периода наблюдения фиксировалось увеличение расслаивания с образованием глубоких трещин и частичного растворения куба. Также было зафиксировано растворение пигмента фотополимерной смолы, что проявлялось в образовании прозрачных и полупрозрачных участков, ориентирующихся преимущественно по граням куба. В результате, по истечении 36 часов визуального контроля поверхности опытного образца, подвергнутого воздействию щелочной среды, были выявлены явные и заметные повреждения. Щелочная среда с pH 13 способствовала частичному растворению опытного образца, сопровождавшемуся расслоением по всей длине, преимущественно вдоль ребер и углов куба. Произошло формоизменение элементов опытного образца: наблюдались разнонаправленные выпучивания плоских частей конструкции вдоль граней куба, что можно объяснить капиллярным эффектом. При набухании фотополимерной смолы было зафикси-

ровано снижение механической прочности: образец стал мягким и поддавался пластинчатой деформации под действием приложенной силы. Фотополимерная смола оказалась неустойчивой к химическому воздействию.

На рисунке 6 представлены модифицированные фотополимерные смолы с графитовым наполнителем после воздействия щелочной среды. По истечении 36 часов нахождения образцов в щелочной среде не было зафиксировано видимых разрушений их структуры. Однако следует отметить, что у образца №6 после воздействия щелочной среды не наблюдалось растворения пигмента фотополимерной смолы; цвет сохраняется благодаря наполнителю – графиту, на который щелочь не оказывает воздействия. Тем не менее, наблюдается расслоение граней, хотя и в меньшей степени, чем у образца без наполнителя. Также при введении графита в образец №2 происходит изменение цвета: смола приобретает светло-серый оттенок, однако на химические характеристики это не сказывается (рис. 6, б). Изменение цвета может лишь ограничить область применения смолы из соображений эстетики или предъявляемых к конечному изделию требований.



Рис. 7. Изготовленные опытные модифицированные образцы графитовым наполнителем после воздействия щелочной среды с pH 13, где а – образец №4; б – образец №5; в – образец №6

Выводы. В качестве модификатора фотополимерных смол был выбран инертный наполнитель графит, представляющий собой кристаллический порошок темно-серого цвета с металлическим блеском. Проведена оценка размеров частиц порошка с использованием растрового электронного микроскопа, в результате чего установлено, что частицы графита имеют размеры от 5 мкм до 25 мкм. Рентгеноструктурный анализ показал, что графитовый наполнитель обладает кристаллической картиной рассеяния и, согласно данным ближнего упорядочения, имеет упорядоченную структу-

ру, близкую к гексагональному графиту. Введение наполнителей в фотополимерную смолу при высоких оборотах с использованием магнитной мешалки позволяет добиться однородной суспензии без образования комков. Также проведено исследование по образованию осадка наполнителей в фотополимерной смоле с целью определения возможности длительного хранения модифицированной смолы. Установлено, что в течение суток порошок не оседает, а остается во взвешенном состоянии в фотополимерной смоле.

Для исследования влияния наполнителя на устойчивость фотополимерной смолы к щелочной среде была осуществлена печать образцов кубической формы на 3D-принтере как чистых фотополимерных смол, так и смол, наполненных графитом.

Исследование опытных образцов на устойчивость к химическим воздействиям (щелочная среда) после модификации графитом продемонстрировало, что у образца HAZ Labs Industrial Rigid чёрного цвета было зафиксировано незначительное расслоение грани, меньше, чем у образца без наполнителя. После воздействия щелочной среды в течение 36 часов не наблюдалось растворения пигмента фотополимерной смолы благодаря графиту, на который щелочь не оказывает влияния. Остальные два образца фотополимеров марок SUNLU ABS-Like и HAZ Labs Industrial Nylon-Like, подвергнутые воздействию щелочи, показали высокие результаты, аналогично смолам без содержания наполнителя, оставаясь неизменными. Видимых разрушений структуры не наблюдалось. Цвет изменился лишь у образца марки HAZ Labs Industrial Nylon-Like при добавлении графита.

Благодаря инертности наполнителя образцы фотополимерных смол продемонстрировали возрастание устойчивости к щелочной среде. Следовательно, для применения фотополимерных смол в химически активных средах, особенно щелочных, оптимальным наполнителем может служить графит.

Список литературы

1. Симакова Е. А., Селякова К. И., Кравченко Д. Применение 3D-печати в строительстве //Инженерные исследования. – 2021. – №. 1. – С. 3-11. EDN: QZZTUT

2. Диков Ю. Ю. и др. Трехмерное моделирование с использованием 3D-печати при реконструктивных операциях на нижней челюсти // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. – 2015. – №. 1. – С. 50-54. EDN: UABWRJ
3. Ходер В. Б., Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – №. 1 (253). – С. 27-32. EDN: XVEGMM
4. Данькив В. М. Возможности использования 3D-печати в различных сферах деятельности // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: проблемы и перспективы. – 2023. – С. 21-23. EDN: LQTFY
5. Морозов А. Б. Применение 3D-принтеров в машиностроении // Студент и наука: актуальные вопросы современных исследований. – 2023. – С. 46-49. EDN: MXPGKZ
6. Конов Г. А. и др. Обзор 3D-печати изделий из магнитных материалов: виды, применение, достижения и проблемы // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2024. – Т. 18. – №. 1. – С. 6-19. EDN: UYHSSF
7. Титов Г. А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Инженерные исследования. – 2022. – №. 3. – С. 8. EDN: HJDIE
8. Терентьев О. В., Терентьев О. В. Материалы для 3D-печати // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке: материалы Международной науч.-произв. конф.-Майский. – 2024. – С. 147-148. <https://belgau.ru/upload/2024/Том%201%20Инж%20ППС.pdf#page=148>
9. Андруцкая Ю. А., Койда В. А. Сравнительная характеристика фотополимерных смол для печати на 3D-принтере // Теоретические и практические аспекты современной медицины. – 2023. – С. 193-194. EDN: PNFGMV
10. Российский производитель строительных 3D принтеров для цеховой печати бетоном // Лерто URL: <https://lerto.ru/> (дата обращения: 04.02.2025)
11. Ефремова А. Я., Пивовар М. Л., Сабодина М. Н. Изменение эксплуатационных свойств фотополимерных материалов для 3D-печати под воздействием химических факторов // Вестник фармации. – 2022. – №. 4 (98). – С. 75-82. DOI: 10.52540/2074-9457.2022.4.75
12. Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов: учеб. пособие / Л.А. Алешина, А.Д. Фофанов // Петрозаводск: Изд-во ПГУ. — 1987. — 88 с.
13. Кузьмичева Г. М. Теория плотнейших шаровых упаковок и плотных шаровых кладок // МВ Ломоносова. М. – 2000
14. Графит // Управление недропользования Министерство по природопользованию и экологии Республики Карелия URL: http://nedrark.karelia.ru/mnia/grafit_karelia.htm (дата обращения: 04.02.2025)

Информация об авторах

М.В. Солоникина – аспирант кафедры физики твёрдого тела, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), тел. +7(921)460-26-50, e-mail: mas31393@yandex.ru.

Д.В. Логинов – кандидат физ.мат. наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), тел. +7(953)547-57-57,

References

1. Simakova E. A., Selyakova K. I., Kravchenko D. The use of 3D printing in construction // Engineering research. – 2021. – No. 1. – pp. 3-11.
2. Dikov Y.Y., Sobolevskiy V.A., Kropotov M.A., Ivashkov V.Y. Mandible reconstruction, using 3D-printing and virtual stl-models. Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin. 2015;(1):50-54. (In Russ.)
3. Khoder V. B., Kordikova E. I., Dyakova G. N. Filled photopolymer composites for 3D printing by stereolithography (review) // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geocology. – 2022. – №. 1 (253). – Pp. 27-32.
4. Dankiv V. M. Possibilities of using 3D printing in various fields of activity // Integration of science, society, production and industry: problems and prospects. – 2023. – pp. 21-23.
5. Morozov A. B. Application of 3D printers in mechanical engineering // Student and science: current issues of modern research. - 2023. – pp. 46-49.

6. Konov G. A. and others. Review of 3D printing of magnetic materials: types, applications, achievements and problems //Izvestiya vuzov. Powder metallurgy and functional coatings. – 2024. – Vol. 18. – No. 1. – pp. 6-19.
7. Titov G. A. Materials for additive technologies in construction //Engineering research. – 2022. – No. 3. – p. 8.
8. Terentyev O. V., Terentyev O. V. Materials for 3D printing //Challenges and innovative solutions in agricultural science: proceedings of the International Scientific and Production Conference in May. - 2024. – pp. 147-148.
9. Andrutskaya Yu. A., Koida V. A. Comparative characteristics of photopolymer resins for 3D printing //Theoretical and practical aspects of modern medicine. - 2023. – pp. 193-194.
10. Russian manufacturer of construction 3D printers for workshop concrete printing // Lerto URL: <https://lerto.ru> / (date of request: 02/04/2025)
11. Efremova A. Ya., Pivovarov M. L., Sadina M. N. Changing the operational properties of photopolymer materials for 3D printing under the influence of chemical factors //Bulletin of Pharmacy. – 2022. – №. 4 (98). – Pp. 75-82.
12. Alyoshina L. A., Fofanov A.D. X-ray structural analysis of amorphous materials: textbook. manual / L.A. Alyoshina, A.D. Fofanov // Petrozavodsk: Publishing House of PSU. — 1987. — 88 p.
13. Kuzmicheva G. M. Theory of the densest spherical packages and dense spherical masonry //MV Lomonosov. M. – 2000
14. Graphite // Management of Subsoil Use Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia URL: http://nedrark.karelia.ru/mnia/grafit_karelia.htm (date of request: 02/04/2025)

Information about the authors

M.V. Soloninkina is a postgraduate student at the Department of Solid State Physics, Petrozavodsk State University (PetrSU), tel. +7(921)460-26-50, e-mail: mas31393@yandex.ru

D.V. Loginov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Physics, Petrozavodsk State University (PetrSU), phone: +7(953)547-57-57,

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was received by the editorial board on 17 Apr. 2025; approved after reviewing 22 Apr. 2025; accepted for publication 05 May 2025.