

PACS: 61.80.Hg, 61.72.-y, 61.80.-x

Н.Ю. Нырков¹, Я.С. Соколовский¹, Д.Р. Беличко¹, Д.Е. Наймушина²,
М.Н. Якименко², А.В. Малецкий³, Д.С. Гроздов³, В.А. Глазунова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФОТОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ $Al(OH)_3$

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

²Донецкий государственный университет

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Статья поступила в редакцию 10 июля 2025 года

Исследована радиационная устойчивость полимер-керамического композита на основе фотополимерной смолы и мелкодисперсного порошка $Al(OH)_3$. Разработана методика получения композита для 3D-печати с использованием LCD-технологии. Образцы изготовлены методом смешивания фотополимера Jewelry J-Cast с порошком $Al(OH)_3$ в концентрациях от 4 до 26 wt%. Исследование радиационной устойчивости проведено путем облучения образцов тепловыми нейтронами на реакторе ИБР-2. Методами ИК-спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии изучены изменения в структуре и составе материала после облучения. Измерены диэлектрические характеристики (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) в диапазоне концентраций наполнителя. Установлено, что добавление наполнителя $Al(OH)_3$ в концентрации до 26 wt% практически не влияет на диэлектрическую проницаемость материала. Облучение образцов привело к охрупчиванию полимерной матрицы, уменьшению размера глобул тонкой структуры полимера, увеличению пористости материала и незначительному (менее 3.5%) изменению диэлектрических свойств. Полученные результаты демонстрируют перспективность разработанного композита для применения в микроэлектронике и в условиях повышенного радиационного фона, где требуются материалы с высокими диэлектрическими и механическими характеристиками.

Ключевые слова: полимер-керамический композит, аддитивные технологии, гидроксид алюминия, диэлектрическая проницаемость, радиационная устойчивость, инфракрасная спектрометрия

Введение

Традиционные методы получения керамических изделий (одноосное прессование, изостатическое прессование, шликерное литье, ленточное литье и литье под давлением [1–4]) имеют свойственные им ограничения – невозможность изготовления деталей сложной формы и высокой точности. Методы постобработки керамических заготовок (токарная и фрезерная обработка) такжеотягощены недостатками – высокими требованиями к обору-

дованию и квалификации оператора, перерасходом исходного материала. Одним из перспективных решений данных проблем является интеграция аддитивных технологий в процесс производства керамических изделий [5]. 3D-печать полимер-керамическими композитами осуществляется из твердого термопластичного прутка (метод FDM) [6] и из фотополимерной смолы или пасты (методы SLA или DLP).

Развитие микроэлектроники как одной из наиболее перспективных областей применения керамических материалов неразрывно связано с совершенствованием технологий производства ее компонентов. Современные требования к изготовлению керамических подложек, корпусов антенн и других элементов микроэлектроники диктуют необходимость использования материалов с уникальными характеристиками, которые можно получить только путем создания специальных композитов, позволяющих решать вышеуказанные проблемы.

Керамические материалы демонстрируют высокие диэлектрические свойства и механическую устойчивость. Однако при изготовлении из этих материалов изделий возникают сложности с их получением и обработкой [7]. Поэтому наряду с классическими керамическими материалами в микроэлектронике находят применение и полимер-керамические композиты. Полимерные материалы отличаются невысокой диэлектрической проницаемостью и малым тангенсом угла диэлектрических потерь, однако они характеризуются значительным коэффициентом линейного теплового расширения. Кроме того, они отличаются простотой в обработке и технологичностью при производстве: хорошо соединяются с другими материалами, легко поддаются механической обработке и позволяют создавать изделия сложной конфигурации с минимальными затратами.

В то же время керамика демонстрирует более высокую диэлектрическую проницаемость при существенно меньшем тангенсе угла диэлектрических потерь. Она отличается повышенной теплопроводностью и низким значением коэффициента линейного теплового расширения, а также минимальным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости. Благодаря использованию в полимерных композитах керамического наполнителя становится возможным эффективное управление свойствами получаемых материалов. Это позволяет целенаправленно регулировать комплекс физико-механических характеристик конечного продукта в зависимости от требуемых эксплуатационных параметров.

Современные методы производства керамических и полимер-керамических композитов находят применение в специфических областях, где традиционные материалы оказываются неэффективными из-за особых условий эксплуатации или сложности технологического процесса. Особенно это актуально для космической отрасли, где изделия подвергаются постоянному радиационному воздействию. В связи с этим возникает необходимость разработки новых материалов, устойчивых к такому воздействию. Керамические и полимер-керамические композиты обладают не только высокой механической прочностью, но и радиационной стойкостью [8–10], что делает их перспективными для использования в подобных условиях.

Таким образом, развитие аддитивных технологий в производстве керамических изделий открывает новые горизонты для изготовления материалов с

заданными характеристиками. Оптимизация производственных циклов, расширение возможностей для создания новых изделий и повышение эффективности технологических процессов делают полимер-керамические композиты инновационным решением для современных технологических задач.

Перспективность данных материалов обусловлена также их потенциалом для дальнейшего совершенствования методик получения композитов и расширения областей применения. Это позволяет говорить о значительном развитии направления в будущем и его важной роли в технологическом прогрессе различных отраслей промышленности.

Цель данной работы – исследование радиационной устойчивости полимер-керамического композита на основе фотополимерной смолы и мелкодисперсного порошка $Al(OH)_3$, а также разработка методики получения данного композита для 3D-печати с использованием LCD-технологии для применения в микроэлектронике и в условиях повышенного радиационного фона.

1. Материалы и методика эксперимента

Для получения серии полимер-керамических образцов фотополимер Jewelry J-Cast производства HARZ Labs смешивали с мелкодисперсным порошком $Al(OH)_3$ в лабораторном миксере. Таким образом была изготовлена серия образцов с концентрациями наполнителя от 4 до 26 wt%. Данные образцы исследованы при помощи методов ИК-спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии, изучены электрические и механические свойства полученного материала.

С целью сравнительного анализа проведены аналогичные исследования на серийном коммерческом фотополимере Dental Send Pro производства HARZ Labs. Как заявлено изготовителем, фотополимер содержит от 10 до 30 wt% наполнителя (табл. 1).

Таблица 1

Составы фотополимерных смол Jewelry J-Cast и Dental Send Pro, заявленные производителями

Наименование компонента	Номер в классификаторе Европейского сообщества	Идентификатор в реестре Chemical Abstracts Service	Классификация по системе и маркировке химических веществ СГС	Массовая доля, %
1	2	3	4	5
Jewelry J-Cast				
Олигоуретан(мет)акрилат	—	—	GHS07 GHS09	10–50
Полиэтиленгликоль-диметакрилат	—	—	GHS07	30–50
Фотоинициатор	278-355-8	75980-60-8	GHS09	1–5
Dental Send Pro				
Олигоуретан(мет)акрилат	—	—	GHS07 GHS09	50–70

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
Полиэтиленгликоль- диметакрилат	—	—	GHS07	3–50
2-гидроксипропил- метакрилат	213-090-3	923-26-2	GHS07	1–5
Фотоинициатор	278-355-8	75980-60-8	GHS09	1–3
Наполнитель	—	—	—	10–30

Примечание. Точные пропорции данных смол являются коммерческой тайной и поэтому производителем не приводятся.

Полученную серию образцов подвергали испытаниям на радиационную устойчивость путем облучения их тепловыми нейтронами на пневмотранспортной установке РЕГАТА горизонтального канала импульсного реактора ИБР-2 [12]. С использованием данной установки транспортные контейнеры с образцами перемещали в канал облучения, расположенный около замедлителей активной зоны реактора. В канале «К2» облучение производили полным спектром реакторных нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов составляла $\sim 2 \cdot 10^{12}$ н/(см²·с) при пиковой мощности 1850 kW. Продолжительность облучения образцов выбирали, исходя из их типа и массы, а также из типа анализируемых элементов (получаемых радиоактивных изотопов – коротко- или долгоживущих). Доза облучения исследуемых образцов составляла $2.34 \cdot 10^{14}$ ion/cm².

Для изучения влияния радиационного воздействия на полимер-керамический композит методом ИК-спектроскопии выполнен сравнительный анализ составов исходных смол от производителей. Исследования проведены на ИК Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27.

Микроструктуру полимера и морфологию частиц Al(OH)₃ изучали на электронном микроскопе JEOL JEM-200A при ускоряющем напряжении 200 kV.

Для измерения диэлектрических свойств полученного полимер-керамического композита на образцы наносили медные контакты и подпаивали выводы. Далее определяли емкость C и тангенс диэлектрических потерь $\tan \delta$ полученного плоского конденсатора (в частотном диапазоне 25 Hz–3 MHz) на измерителе иммитанса E7-30, оборудованном специальной измерительной ячейкой.

На основании собранных данных вычислена относительная диэлектрическая проницаемость ϵ исследуемых образцов по формуле

$$\epsilon = \frac{Ch}{\epsilon_0 S},$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m – диэлектрическая постоянная, S – площадь поверхности образца, h – толщина образца.

Также проведена оценка погрешности измерений диэлектрической проницаемости:

$$\delta = \pm A_1 A_2 \sqrt{\frac{1 \text{ V}}{U}} (1 + \operatorname{tg} \delta),$$

где A_1, A_2 – поправочные коэффициенты прибора Е7-30; U – значение напряжения испытательного сигнала (при всех экспериментах $U = 1 \text{ V}$).

Кроме того, методом гидростатического взвешивания измерены такие физические характеристики, как плотность ρ и пористость ε исходных и облученных образцов.

2. Результаты исследований

На первом этапе исследований проведен анализ структуры исходного порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$, который в дальнейшем выступает в роли наполнителя в фотополимере. Снимок частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$, полученный на электронном микроскопе JEM-200A, представлен на рис. 1. Согласно результатам СЭМ частицы слабо агрегированы, имеют размеры в диапазоне от 300 до 1000 nm.

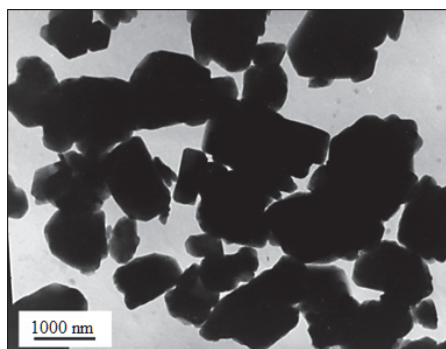


Рис. 1. Снимок частиц порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$, полученный при помощи СЭМ

На следующем этапе выполнен анализ состава полимера, на основе которого создавались образцы. Результаты ИК-спектроскопии фотополимерных смол Jewelry J-Cast и Dental Sand Pro приведены на рис. 2, расшифровка спектрограмм дана в табл. 2.

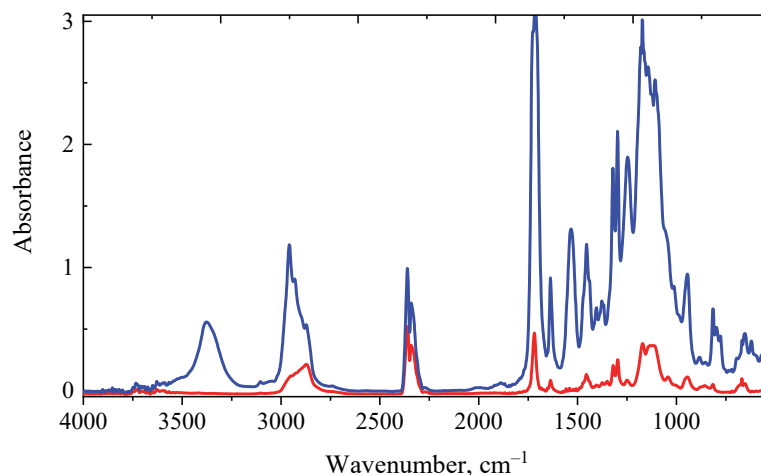


Рис. 2. ИК-спектры фотополимерных смол Jewelry J-Cast (—) и Dental Sand Pro (—)

Таблица 2
Расшифровка спектрограмм составов фотополимерных смол Jewelry J-Cast и Dental Sand Pro, представленных на рис. 2

Волновое число, cm^{-1}	Структурные фрагменты и типы колебаний
3360	Валентные колебания OH; относятся к соединению 2-гидроксипропилметакрилат, заявленному в составе Dental Sand Pro
2900–2864	Колебания связи функциональных групп C–H (CH_3 , CH_2 , CH); разница пиков может говорить о разнице количества этих групп
2400	Колебания, отвечающие за CO_2
1924–1800	Отголоски ароматики (полосы обертона)
1708	Валентные колебания связи C=O
1126	Алифатическая полоса связи C–O–C; разница ширины полос на спектре говорит о том, что повторяемость некоторых участков олигомеров разная, в Dental Sand Pro больше полиэтиленгликоль диметилакрилата
1190	Оксиды, фосфины, ароматические (бензольные) группы
948–840	Ароматические соединения с 1,2,3,5-замещением
860–620	Скелетные колебания эпоксидных колец

Как видно из рис. 2, оба состава в основном идентичны. Отличие состоит в том, что в составе Dental Send Pro присутствует 2-гидроксипропилметакрилат (как и было заявлено производителем). Кроме того, в смолах разная концентрация олигомеров, необходимых для достижения требуемой вязкости конечного состава для применения в 3D-печати.

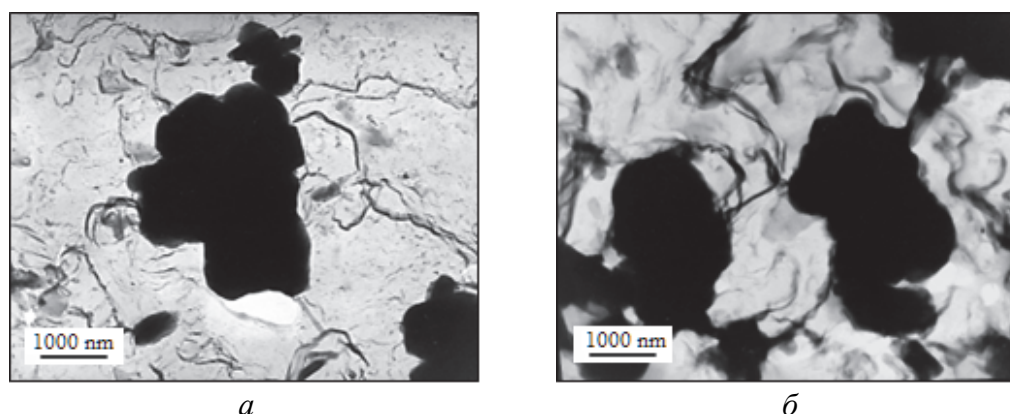


Рис. 3. Структуры поверхностей исследуемых образцов с концентрацией наполнителя 26 wt% до (а) и после (б) воздействия нейтронного облучения

После получения полимер-керамической суспензии и печати из нее образцов были проведены испытания на радиационную устойчивость полученного композита. На рис. 3 представлены снимки поверхностей разрушения исходного образца до и после облучения. Так, до облучения на поверхности разрушения видны экстрагированные агрегаты частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$, что свидетельствует о недостаточной диспергации исходного порошка в фотополимере. В облученном же образце помимо экстрагированных агрегатов частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$ наблюдается также

значительное количество экстрагированных частиц полимерной матрицы, что говорит об охрупчивании материала под воздействием облучения.

Снимки тонкой структуры полимерной матрицы представлены на рис. 4. В исходном образце видим глобулярную структуру полимера с размером глобул от 20 до 50 nm, а в образце, подвергнутом облучению тепловыми нейтронами, – значительное уменьшение размеров глобул, что подтверждает охрупчивание полимерной матрицы.

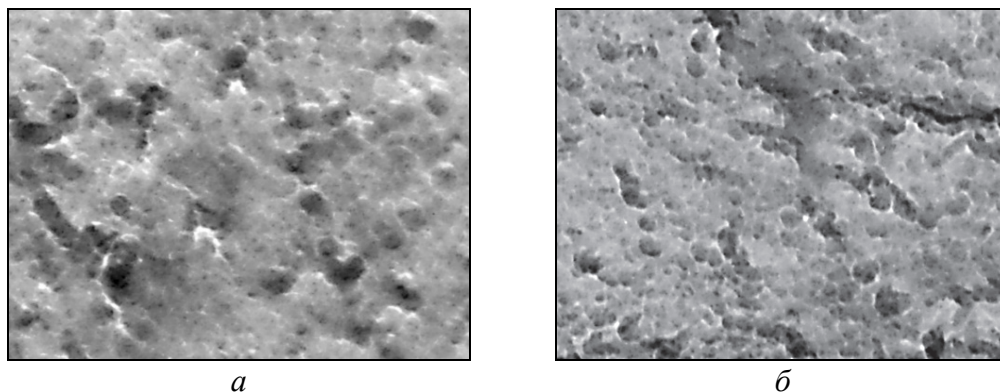


Рис. 4. Структуры полимерной матрицы до (а) и после (б) воздействия нейтронного облучения

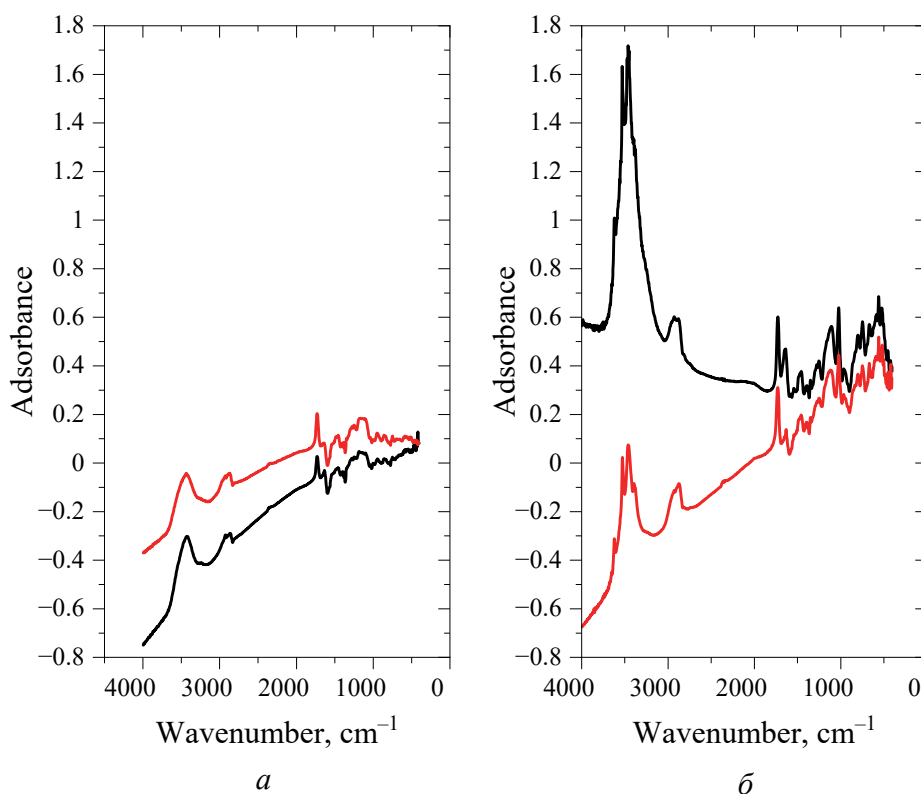


Рис. 5. ИК-спектры фотополимерной смолы Jewelry J-Cast без наполнителя (а) и с введенным наполнителем в виде порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$ (б) до (—) и после (—) воздействия нейтронного облучения

При помощи ИК-спектроскопии проведен сравнительный анализ составов полимеризованных образцов без наполнителя и с концентрацией наполнителя, равной 26 wt%, до и после облучения (рис. 5). Из спектрограмм видно, что составы образцов с наполнителем и при его отсутствии до и после облучения идентичны, что может говорить об устойчивости химического состава фотополимерных смол и наполнителя к радиационному воздействию. Расшифровка спектрограмм представлена в табл. 3.

Таблица 3

Расшифровка спектрограмм фотополимерной смолы Jewelry J-Cast без наполнителя и с введенным наполнителем $\text{Al}(\text{OH})_3$ до и после облучения

Волновое число, cm^{-1}	Структурные фрагменты и типы колебаний
3450	Валентные колебания OH-группы
2929	Валентные колебания C–H-связей функциональной группы CH_3
2902	Валентные колебания C–H-связей функциональной группы CH_2 ; слабо выражены
2869	Валентные колебания C–H-связей функциональной группы CH
1730	Валентные колебания связи C=O
1637–1379	Скелетные колебания эпоксидной матрицы
1169–1098	Валентные колебания связи P–O–Ar
857–560	Скелетные колебания эпоксидной матрицы
549	Колебания связи Al–O; присутствуют только в образцах с наполнителем

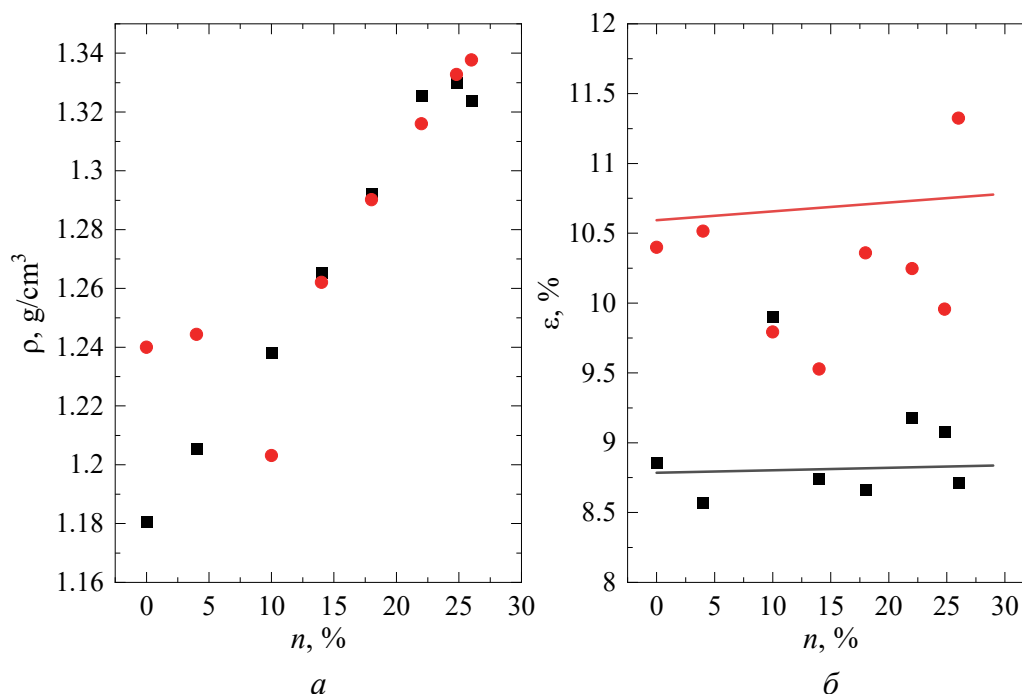


Рис. 6. Зависимости плотности ρ (а) и пористости ε (б) фотополимера с введенным наполнителем $\text{Al}(\text{OH})_3$ различных концентраций n до (●) и после (■) воздействия нейтронного облучения

На рис. 6 изображены зависимости плотности ρ и пористости ϵ исследуемых образцов от концентрации n наполнителя до и после воздействия нейтронного облучения. Если провести «аппроксимацию» (для наглядности) кривых пористости до и после облучения, можно наблюдать, что в среднем с ростом концентрации наполнителя в облученных образцах (рис. 6,б) пористость растет по сравнению с необлученными образцами. Это подтверждается ранее проведенным анализом структуры полимера и объясняется уменьшением размера глобул, появлением большего количества пор в полимерной матрице и, как следствие, охрупчиванием материала [14].

Также выполнен сравнительный анализ плотности и пористости облученных и необлученных образцов из фотополимера Dental Send Pro и образцов с наполнителем $\text{Al}(\text{OH})_3$ с концентрацией $\sim 26\%$ (наиболее близкой к концентрации наполнителя в Dental Send Pro) (табл. 4).

Таблица 4

Плотность и пористость образцов полимер-керамического композита с содержанием наполнителя $\sim 26\%$

Образцы	Плотность, g/cm^3	Пористость, %
А	1.3238	8.7139
Б	1.3377	11.3245
Dental Send Pro	1.3035	1.065

Примечание. Образцы А, Б – фотополимеры Jewelry J-Cast, наполненные порошком $\text{Al}(\text{OH})_3$ с концентрацией 26 wt%, соответственно до и после воздействия нейтронного облучения.

Как видим, величины плотности у всех трех образцов различаются не более чем на 4%, что может говорить о равенстве данного параметра во всех образцах. Но при этом в необлученном образце А наблюдается на порядок больший процент пористости, чем в образце Dental Send Pro, что подтверждает ранее сделанный вывод о недостаточной диспергированности исходного порошка в полимерной матрице.

Для оценки возможности применения исследуемых полимер-керамических композитов в области микроэлектроники было необходимо измерить диэлектрические свойства образцов. Анализ графиков рис. 7 показывает, что в рассматриваемом диапазоне концентраций наполнителя незначительно влияет на диэлектрическую проницаемость материала, и она остается близкой к показателям полимера без наполнителя.

Кроме того, был проведен сравнительный анализ диэлектрической проницаемости ϵ полученных образцов с наполнителем $\text{Al}(\text{OH})_3$ с концентрацией 26% и фотополимера Dental Send Pro (рис. 8).

По данным работы [11], у полимера ПТФЭ с наполнителем SiO_2 с концентрацией 30 wt% $\epsilon = 2.591$, у чистого оксида алюминия $\epsilon = 9.8$, у фотополимера политетрафторэтилена (близкого по составу к исследуемому фотополимеру Jewelry J-Cast без наполнителя) $\epsilon = 2.1$ [13]. В случае фотополимера Dental Send Pro (близкого по составу к полимеру ПТФЭ с наполнителем SiO_2 (30%)) средняя диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 3.7$.

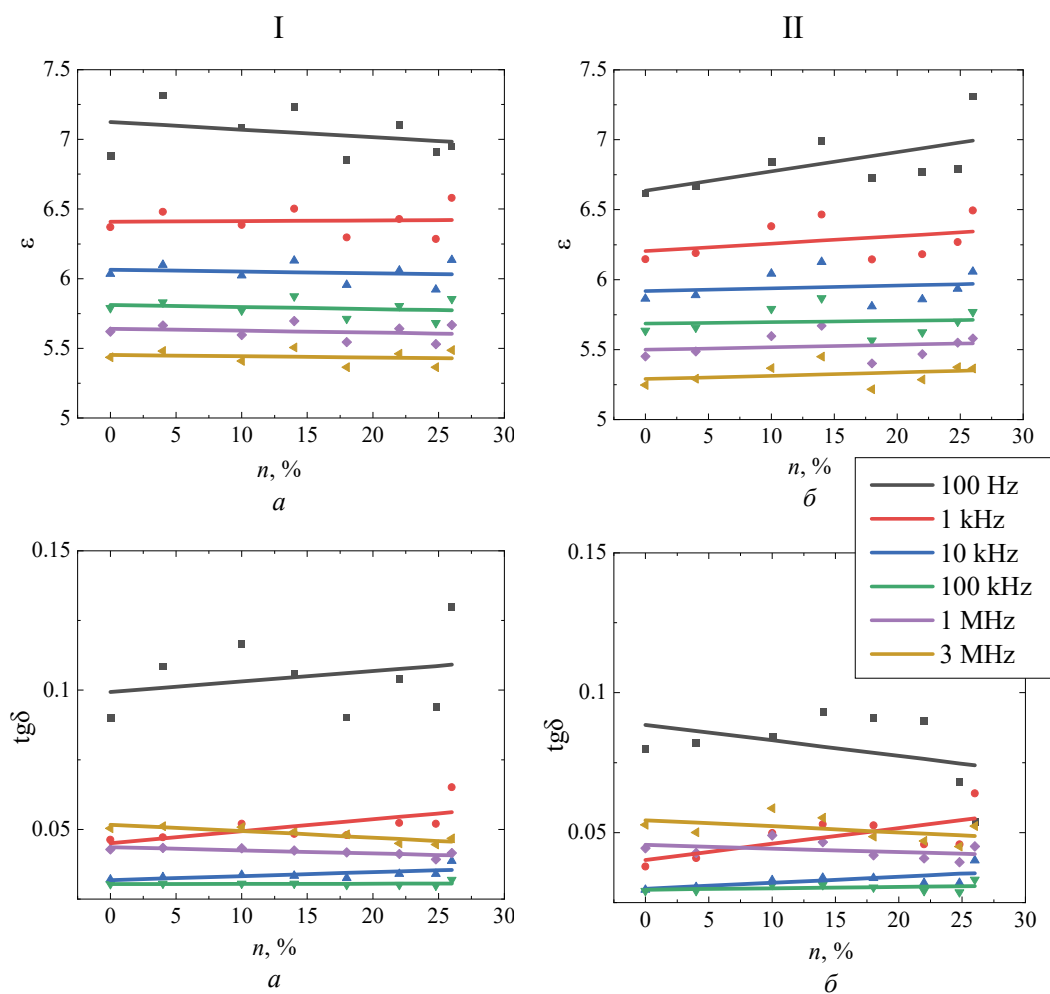
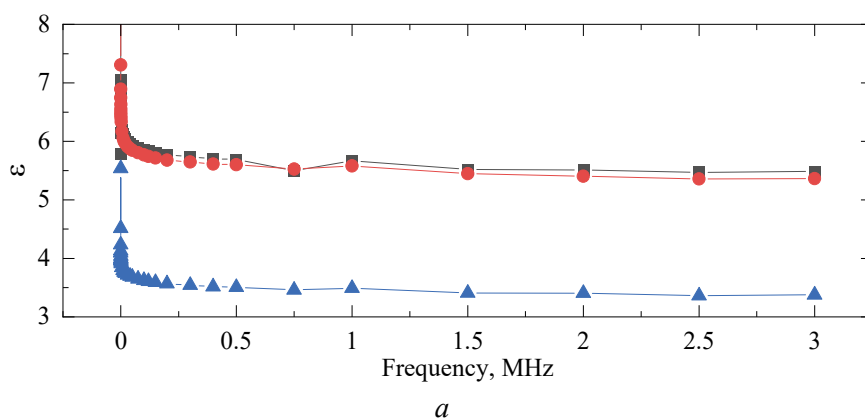


Рис. 7. Зависимости диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (б) от концентрации наполнителя n в необлученных (I) и облученных (II) образцах

Как видно из графиков рис. 8, диэлектрическая проницаемость полученных нами образцов с наполнителем $\text{Al}(\text{OH})_3$ (26 wt%) составляет в среднем 5.8, что выше, чем у образцов Dental Send Pro.



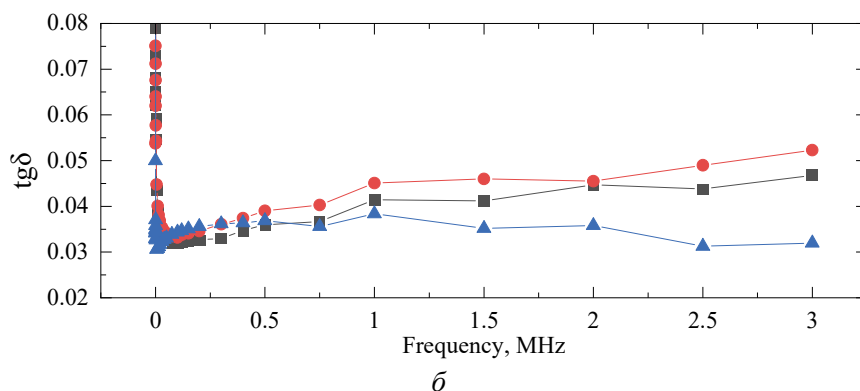


Рис. 8. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (a) и тангенса угла диэлектрических потерь (b) облученных (■) и необлученных (●) образцов с наполнителем Al(OH)₃ (26%) и образцов из фотополимера Dental Send Pro (▲)

При исследовании образцов была проведена оценка погрешности измерений. На частотах до 100 Hz погрешность измерений δ составляла $\sim 10\%$, а при более высоких частотах она снижалась до 2% . Анализ данных показывает, что разброс значений диэлектрической проницаемости ϵ образцов находится в пределах погрешности измерений. Это позволяет сделать вывод о том, что облучение оказывает незначительное влияние на диэлектрические свойства полученного нами материала. Изменение диэлектрической проницаемости составляет всего 0.2 единицы, что соответствует отклонению в 3.5% при погрешности измерений $\delta \approx 2\%$.

Заключение

Разработана эффективная методика получения полимер-керамического композита на основе фотополимерной смолы и мелкодисперсного порошка Al(OH)₃, пригодного для 3D-печати методом LCD. В ходе исследований было установлено, что добавление наполнителя Al(OH)₃ в концентрации до $n = 26\%$ практически не влияет на диэлектрическую проницаемость материала, которая остается близкой к показателям полимера без наполнителя. Результаты ИК-спектроскопии показали идентичность составов образцов с наполнителем и при его отсутствии до и после облучения, что свидетельствует об устойчивости химического состава фотополимерных смол и наполнителя к радиационному воздействию. Облучение образцов тепловыми нейтронами вызвало следующие изменения: охрупчивание полимерной матрицы, уменьшение размера глобул тонкой структуры полимера, увеличение пористости материала и незначительное (менее 3.5%) изменение диэлектрических свойств.

Полученные результаты демонстрируют перспективность разработанного композита для применения в микроэлектронике и в условиях повышенного радиационного фона, где требуются материалы с высокими диэлектрическими и механическими характеристиками.

1. H. Sarraf, R. Herbig, M. Maryska, *Scr. Mater.* **59**, 155 (2008).
2. J. Echeberria, J. Ollo, M.H. Bocanegra-Bernal, A. Garcia-Reyes, C. Dominguez-Rios, A. Aguilar-Elguezabal, A. Reyes-Rojas, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* **28**, 399 (2010).
3. S.K. Wang, J.Y. Yu, Q. Li, E.Y. Zheng, Y.G. Duan, G.C. Qi, *Adv. Mater. Res-Switz.* **569**, 324 (2012).
4. M. Jimenez-Melendo, C. Clauss, A. Dominguez-Rodriguez, G. De Portu, E. Roncari, P. Pinasco, *Acta Mater.* **46**, 3995 (1998).
5. J.W. Halloran, *Annu. Rev. Mater. Res.* **46**, 19 (2016).
6. А.И. Зайцев, А.В. Сотов, А.Э. Абдрахманова, А.А. Попович, *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия* **18**, № 6, 77 (2024).
7. A.V. Maletskii, G.K. Volkova, D.R. Belichko, V.A. Glazunova, *Ceram. Int.* **50**, 7 (2024).
8. Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, А.В. Малецкий, Р.Ш. Исаев, *Вопросы материаловедения* № 3(119), 46 (2024).
9. A.V. Maletskii, R. Isayev, D.R. Belichko, G.K. Volkova, Z. Slavkova, Yu.V. Aleksiaeynak, *Ceram. Int.* **51**, 32637 (2025).
10. Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, А.В. Малецкий, Р.Ш. Исаев, М.Н. Якименко, А.А. Зозуля, *Журнал технической физики* **95**, 1571 (2025).
11. А.Н. Хрусталева, А.В. Смирнов, Л.А. Арбанас, В.Е. Базарова, И.Д. Симонов-Емельянов, *Авиационные материалы и технологии* № 4, 95 (2024).
12. D. Grozdov, V. Galustov, I. Zinicovscaia, *J Radioanal Nucl Chem* **334**, 2435 (2025).
13. K.P. Murali, S. Rajesh, *Om Prakash, Mater. Chem. Phys.* **113**, 290 (2009).
14. А.В. Малецкий, Р.Ш. Исаев, Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, *Вопросы материаловедения* № 2(122), 130 (2025).

N.Yu. Nyrkov, Ya.S. Sokolovskii, D.R. Belichko, D.Ye. Najmushina, M.N. Yakimenko, A.V. Maletskii, D.S. Grozdov, V.A. Glazunov

STUDY OF RADIATION STABILITY OF THE $\text{Al}(\text{OH})_3$ BASED PHOTOPOLYMER COMPOSITE

Radiation stability of polymer-ceramics composite based on a photopolymer resin and the fine-dispersed $\text{Al}(\text{OH})_3$ powder is studied. A method for LCD-based production of a composite used for 3D printing is developed. The samples are produced by mixing of the Jewelry J-Cast photopolymer and the $\text{Al}(\text{OH})_3$ powder within the concentration range from 4 to 26 wt%. The study of the radiation stability is carried out by slow-neutron irradiation of the samples using reactor IBR-2. Evolution of the structure and the composition after irradiation is studied by IR-spectrometry and transmitting electron microscopy. The dielectric characteristics (dielectric permeability and dielectric loss tangent) are measured within the concentration range of the filler. It is found that doping with the $\text{Al}(\text{OH})_3$ filler at the concentration below 26 wt% does not affect the dielectric stability of the material. Irradiation results in embrittlement of the polymer matrix, reduction in the size of the globules of the fine structure of the polymer, increase in the porosity and small change in the dielectric properties (below 3.5%). The obtained results

demonstrate promising features of the designed composite to be employed in microelectronics under enhanced radiation background, where the materials with high dielectric and mechanical characteristics are required.

Keywords: polymer-ceramics composite, additive technologies, aluminum hydroxide, dielectric permeability, radiation stability, infra-red spectroscopy

Fig. 1. SEM image of the particles of the $\text{Al}(\text{OH})_3$ powder

Fig. 2. IR spectra of photopolymer resin Jewelry J-cast (—) and Dental Sand Pro (—)

Fig. 3. Surface structure of the samples at the filler concentration of 26 wt% before (a) and after (b) neutron irradiation

Fig. 4. Structure of the polymer matrix before (a) and after (b) neutron irradiation

Fig. 5. IR spectra of photopolymer resin Jewelry J-cast without a filler (a) and doped by the $\text{Al}(\text{OH})_3$ powder (b) before (—) and after (—) neutron irradiation

Fig. 6. Concentration n dependences of density ρ (a) and porosity ε (b) of the $\text{Al}(\text{OH})_3$ doped photopolymer before (●) and after (■) neutron irradiation

Fig. 7. Concentration n dependences of dielectric permeability ε (a) and dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$ (b) in the non-irradiated samples (I) and irradiated ones (II)

Fig. 8. Frequency dependences of dielectric permeability (a) and dielectric loss tangent (b) in the irradiated samples (■) and non-irradiated ones (●) doped by $\text{Al}(\text{OH})_3$ (26%) and photopolymer samples Dental Send Pro (▲)