

Оригинальная статья

УДК 620.22:620.17
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.603-618>

Получение градиентных композиционных материалов на основе АБС-пластика методом 3D-печати

Я. Алиалшами¹, Л.М. Амирова², Ю.И. Журавлева¹, Р.Р. Амиров¹✉

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
г. Казань, Россия

✉ramirov@kpfu.ru

Аннотация

Изучены возможности и преимущества 3D-печати градиентных материалов при создании слоистых композитов на основе АБС-пластика с добавками углеродных волокон (УВ) и наночастиц оксида железа (НЧ). Методом 3D-печати получены образцы с различным наполнением добавок, а также градиентный образец с постепенным изменением состава (содержание добавок, % (масс.)): 30 УВ, 15 УВ, 0, 5 НЧ, 15 НЧ. Определены теплофизические, механические и магнитные свойства образцов, проанализировано влияние на них качественного и количественного состава. На основе 3D-моделирования и предварительного анализа межслойной адгезии показана необходимость наличия промежуточного слоя чистого полимера между слоями с УВ и НЧ. Выбраны параметры 3D-печати и изготовлена деталь градиентного состава, используемая при создании промышленного робота. В целом, показано, что путем спланированного включения различных материалов или добавок в определенные места в композите можно достичь уникальных комбинаций механических, термических и электрических свойств, адаптированных к конкретным применениям.

Ключевые слова: функционально-градиентный композит, АБС-пластик, углеродные волокна, магнитные наночастицы, 3D-печать, физико-механические свойства, теплофизические свойства, магнитная восприимчивость.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («Приоритет-2030»).

Для цитирования: Алиалишами Я., Амирова Л.М., Журавлева Ю.И., Амиров Р.Р. Получение градиентных композиционных материалов на основе АБС-пластика методом 3D-печати // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 603–618. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.603-618>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.603-618>

Production of gradient composite materials based on ABS plastic using 3D printing

Ya. Alialshami¹, L.M. Amirova², Yu.I. Zhuravleva¹, R.R. Amirov¹✉

¹*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

²*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia*

✉ ramirov@kpfu.ru

Abstract

The benefits and advantages of using 3D gradient printing to create ABS plastic-based layered composites reinforced with carbon fibers (CF) and iron oxide nanoparticles (NP) were studied. Samples with different additive contents, as well as a gradient sample with a gradual change in composition (additive content, wt.-%: 30 CF, 15 CF, 0, 5 NP, 15 NP), were 3D printed. The thermophysical, mechanical, and magnetic properties of all samples were determined, and the influence of both qualitative and quantitative composition on them was analyzed. Based on the 3D modeling and the preliminary analysis of interlayer adhesion, the need for an intermediate layer of pure polymer between the layers with CF and NPs was shown. Optimal 3D printing settings were selected, and a part with a gradient composition was manufactured and subsequently used to assemble an industrial robot. Overall, the results reveal that deliberate incorporation of various materials or additives into specific regions of a composite offers a way to realize unique combinations of its mechanical, thermal, and electrical properties, tailored to specific applications.

Keywords: functionally graded composite, ABS plastic, carbon fibers, magnetic nanoparticles, 3D printing, physical and mechanical properties, thermophysical properties, magnetic susceptibility

Acknowledgments. This study was supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030).

For citation: Alialshami Ya., Amirova L.M., Zhuravleva Yu.I., Amirov R.R. Production of gradient composite materials based on ABS plastic using 3D printing. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 603–618. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.603-618>. (In Russian)

Введение

Разработка новых материалов и методов их получения является движущей силой прогресса в науке о материалах [1]. Среди новых решений в этой области можно выделить функционально-градиентные материалы (ФГМ) – класс материалов с пространственным изменением состава, что позволяет адаптировать их под специфические требования [2], благодаря тщательному подбору состава и технологии получения [3]. В природе у различных видов живых организмов в результате адаптации к окружающей среде появились свои уникальные ФГМ [4–6]. Сам термин «функциональный градиентный материал» был

введен в Японии в 1984 г. для теплоизоляционных материалов градиентной структуры [7]. Хотя активные разработки природоподобных ФГМ начались в 1972 г. [8], технологические ограничения замедлили работу [9]. В последнее время интерес к ФГМ растет, благодаря возможности создавать материалы с индивидуальными свойствами для высоких технологий, таких как аэрокосмическая отрасль и биоинженерия. Одним из перспективных путей получения ФГМ является аддитивное производство, методы которого эволюционировали от создания прототипов к производству готовых деталей. Функционально-градиентное аддитивное производство (ФГАП) [10, 11] – это ориентированный на материалы процесс, переходящий от программного моделирования к моделированию производства [12]. Одно из направлений аддитивного производства – 3D-печать – обеспечивает эффективную платформу для создания сложных 3D-объектов из цифровых моделей [13, 14]. Этот метод использует гибкость производства и возможность пространственного распределения составов материалов [15, 16]. Метод экструзии также стал интересным для производства композиционных материалов, таких как армированные волокнами композиты [17, 18]. Технологии аддитивного производства позволяют контролировать плотность и направление осаждения материалов в сложном трехмерном распределении или комбинировать различные материалы для создания бесшовных структур [19]. Регулирование плотности в ФГАП способствует созданию легких конструкций с сохранением прочности [20, 21].

ФГАП основано на концепции мультиматериальности с использованием динамически составленных градиентов и сложной морфологии для управления геометрическим и материальным расположением различных фаз, что определяет функции и свойства конечного компонента [22, 23]. Основная цель ФГАП с несколькими материалами – улучшение межфазной связи между разнородными материалами, чтобы добиться монолитного многослойного дизайна. Это помогает избежать трещин, возникающих из-за поверхностного натяжения в традиционном производстве, за счет внедрения дискретных изменений в структуру материалов [10]. Использование различных коэффициентов расширения в критических местах также уменьшает напряжения и улучшает распределение остаточных напряжений и механические свойства материала [24–26].

Разработка магнитных материалов на полимерной основе способствует повышению гибкости дизайна и расширяет возможности их применения в различных областях, включая робототехнику и интеллектуальные электронные системы. Магнитные материалы играют ключевую роль в проектировании современных роботов, обеспечивая повышение их функциональной эффективности. Например, магнитное поле можно использовать в качестве бесконтактного источника для управления движением и ориентацией магнитных материалов внутри конструкций, что приводит к заметным изменениям механических, электрических, тепловых и оптических свойств после выравнивания. Кроме того, системы со встроенными магнитными компонентами демонстрируют выдающиеся характеристики управляемого движения под воздействием внешнего магнитного поля и могут рассматриваться как перспективное инженерное решение для имитации движений растений и животных. Однако введение магнитных компонентов в состав изделий не должно ухудшать их эксплуатационных характеристик. Использование «градиентного» подхода может позволить сохранить механические характеристики магнитного композита.

В настоящем исследовании рассмотрены возможности 3D-печати градиентных материалов путем разработки слоистых композитов с различными добавками, что позволяет стратегически внедрять материалы в определенные участки композита для достижения

уникальных механических, термических, магнитных и электрических свойств. Получены гранулы полиакрилонитрил–бутадиен–стирольного пластика (АБС), наполненные короткими углеродными волокнами (УВ) или наночастицами оксида железа (НЧ Fe_3O_4), из которых изготовлены нити для 3D-печати. Напечатаны градиентные образцы для исследования свойств материала, а также деталь, применимая в изготовлении промышленных роботов. Представлен анализ теплофизических, магнитных и механических свойств напечатанных градиентных материалов, полезный для понимания их потенциальных приложений и будущих направлений дизайна материалов. Определены параметры технологического процесса производства изделия методом 3D-печати.

1. Материалы и методы

1.1. Объект исследования. Выбранный объект – пластина из градиентного полимерного композита, изготовленная с помощью 3D-печати, что позволяет контролировать распределение компоненты по толщине (рис. 1, *a*). Для оптимальных механических свойств и высокой жесткости на изгиб необходимо варьировать содержание углеродных волокон и магнитных частиц, создавая градиентное распределение от поверхностных к центральным слоям. Объект состоит из пяти слоев (рис. 1, *б*), где нижний слой представляет собой АБС, наполненный на 15 % магнитными НЧ. Следующий за ним слой – это АБС с содержанием магнитных НЧ 5 %. Средний слой состоит из чистого АБС. Затем следует слой АБС, армированного короткими УВ (15 % (масс.)). Верхний слой представляет собой АБС, армированный короткими УВ (30 % (масс.)). Такое сочетание составов улучшает прочностные характеристики и устойчивость к деформациям: более высокое содержание УВ в поверхностных слоях увеличивает прочность и жесткость, а магнитные НЧ в нижних слоях улучшают взаимодействие с магнитными полями и устойчивость к внешним воздействиям, что в итоге создает изделие с оптимальными эксплуатационными характеристиками и повышенным сроком службы.

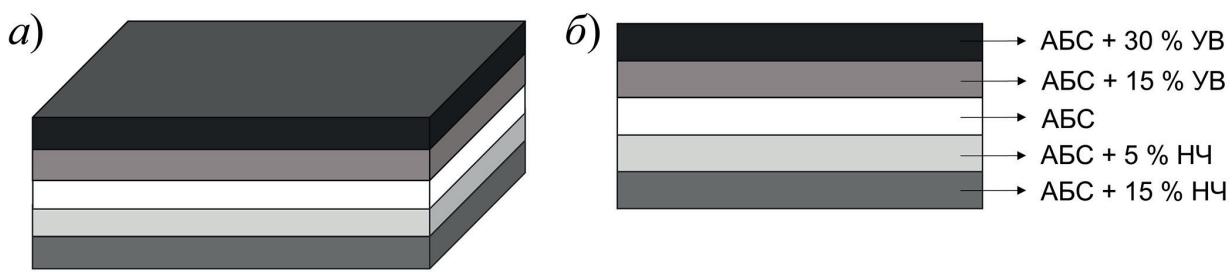


Рис. 1. Объект исследования (*а*) и распределение в нем градиента по слоям (*б*)

Fig. 1. The sample under study (*a*) and the gradient distribution in its layers (*b*)

1.2. Исследуемые материалы. Для подготовки композитных нитей к 3D-печати использовали гранулы АБС марки Ultramid с размером частиц 3 мм и плотностью 1.04 г/см³, наполненные короткими УВ типа Torayca T300 (Toray Industries, Япония) плотностью 1.8 г/см³ и длиной 5 мм, а также НЧ Fe_3O_4 (Sigma-Aldrich, Германия) плотностью 5.2 г/см³ и насыщенной магнитной индукцией 450 мТл. Эти компоненты были тщательно смешаны с использованием экструзии в двухшнековом смесителе тип Scientific LCR-300 (Labtech Engineering, Таиланд) при температуре 240 °C. Нити для последующей 3D-печати экструдировали из самого АБС, АБС + короткие УВ (30 % масс.), АБС + короткие УВ (15 % масс.), АБС + НЧ Fe_3O_4 (5 % масс.), АБС + НЧ Fe_3O_4 (15 % масс.).

1.3. Методы исследования. Воздействие добавок на термические характеристики АБС исследовано с использованием дифференциального сканирующего калориметра DSC 214 Polyma (Netzsch, Германия). Для определения термического сопротивления чистых, наполненных, армированных и градиентных полимеров применяли динамический механический анализатор DMA 242 E Artemis (Netzsch, Германия) в соответствии с ASTM E 1640–94 [27], при амплитуде деформации 0.1 %, частоте 1 Гц и скорости нагрева 5 К/мин. Магнитную восприимчивость измеряли с помощью прибора PPMS-9 (Quantum Design, США). Ударную вязкость углепластиков определяли согласно ГОСТ 4647–2015 [28] с использованием маятникового копра ТСКМ-50 (Тест-системы, Россия). Образцы, необходимые для испытаний на ударную вязкость и динамический механический анализ, были напечатаны на 3D-принтере Anycubic Kobra (Anycubic, КНР) в следующих условиях: скорость печати 40 мм/с; высота слоя 0.15 мм; температура сопла 240 °С и плотность заполнения 100 % (рис. 2).

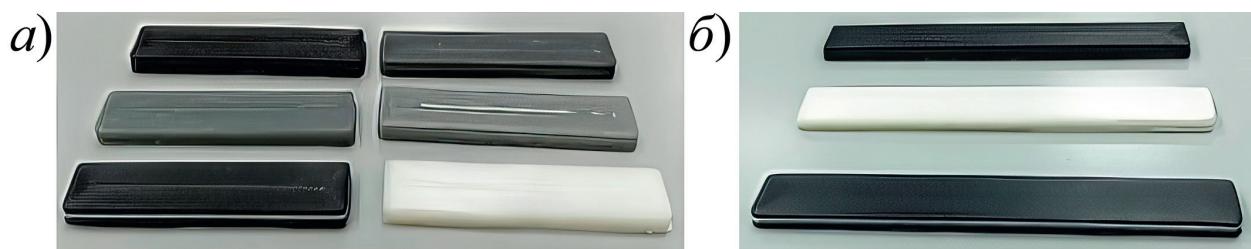


Рис. 2. Образцы для динамического механического анализа (а) и испытаний на ударную вязкость (б)
Fig. 2. The samples for dynamic mechanical analysis (a) and impact testing (b)

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Изготовление нитей функционально градиентных материалов из наполненного АБС. 3D-печать градиентной полимерной композитной пластины осуществляют с использованием гранул АБС-пластика в сочетании с гранулами, наполненными УВ или НЧ Fe_3O_4 . Наполненные гранулы концентрата АБС используют в процессе экструзии для получения однородного композитного материала. После экструзии полученные гранулы концентрата, а также чистые гранулы АБС без наполнителей, загружаются в специальные бункеры, откуда они подаются на печатающее устройство с учетом заранее рассчитанного массового соотношения между концентратором и полимером для каждого слоя. Это позволяет точно контролировать содержание углеродных волокон и наночастиц в конечном продукте. Затем гранулы перемешиваются в смесителе согласно программным настройкам и расплавляются при той же температуре, создавая готовую массу для 3D-печати, что обеспечивает высокую точность и качество получаемых изделий.

2.2. Термический анализ образцов. Термический анализ проведен для пяти различных образцов полимерных материалов. Первый образец, состоящий из АБС с добавлением 30 % (масс.) УВ, позволяет оценить влияние высокой концентрации армирующего наполнителя на термические свойства материала. Второй образец отличается только содержанием УВ (15 % (масс.)) и дает возможность сравнить эффекты при меньшем содержании наполнителя. Третий образец включает 5 % (масс.) магнитных НЧ, что позволяет установить влияние низкой концентрации магнитного наполнителя на термическое поведение материала. Четвертый образец представляет собой АБС с содержанием магнитных НЧ 15 % (масс.), что дает представление о влиянии более высокого содержания магнитного наполнителя на термические характеристики. Пятый образец изготовлен из АБС без добавок и является

реперной точкой для оценки изменений в термических свойствах модифицированных образцов. Соответствующие параметры термического анализа представлены в табл. 1. Кривые плавления образцов показаны на рис. 3.

Табл. 1. Результаты термического анализа образцов АБС

Table 1. Thermal analysis of the ABS samples

Образец	Плавление		Стеклование	
	$t_{\text{пика}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{начала}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{середины}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{середины}}, \text{Дж}$
АБС	109.1	98.7	89.9	0.179
АБС + 30 % (масс.) УВ	104.9	96.7	93.8	0.038
АБС + 15 % (масс.) УВ	106.6	96.9	104.5	0.037
АБС + 5 % (масс.) НЧ	112.3	105.7	103.8	0.105
АБС + 15 % (масс.) НЧ	114.1	106.6	104.4	0.133

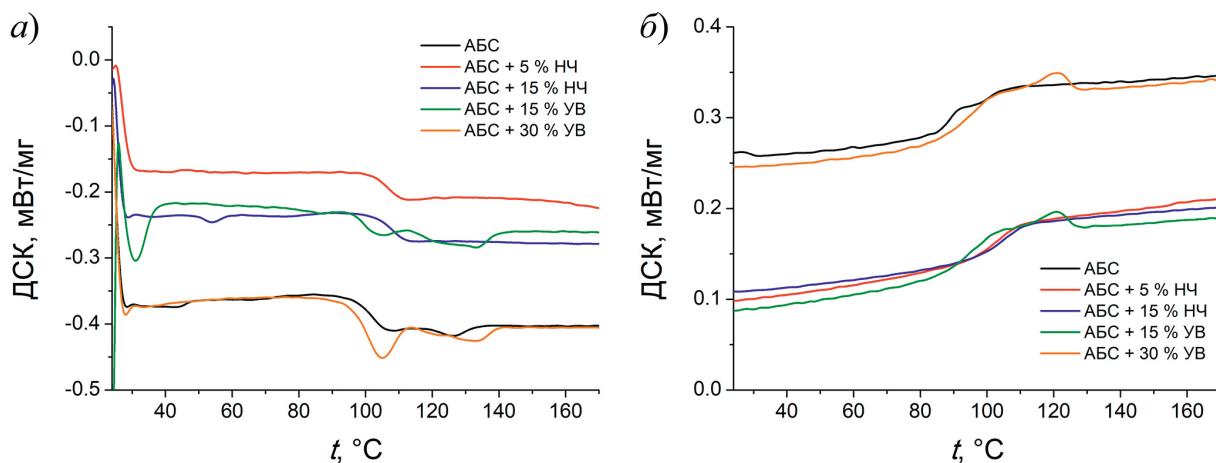


Рис. 3. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии при нагревании (a) и охлаждении (б)
Fig. 3. Differential scanning calorimetry curves during heating (a) and cooling (b)

Результаты термических испытаний образцов, содержащих магнитные НЧ, показывают увеличение температуры пика плавления и температуры стеклования по сравнению с АБС без добавок, что свидетельствует об улучшении тепловых характеристик АБС. Это связано с тем, что магнитные НЧ способствуют более эффективному распределению тепла внутри полимерной матрицы и усиливают межмолекулярные взаимодействия. Поэтому модифицированный магнитными НЧ АБС может применяться в условиях, требующих высокой термической стабильности и устойчивости к деформации при повышенных температурах. Следует отметить, что все образцы, армированные различными наполнителями, также продемонстрировали улучшение температуры стеклования по сравнению с чистым АБС, что свидетельствует о положительном влиянии армирования на термические свойства полимеров в целом.

2.3. Динамический механический анализ образцов. После завершения процесса печати полученные образцы подвергали динамическому механическому анализу. Эта техника позволяет выявить тонкие различия в механических свойствах образцов под воздействием температур. Температурные зависимости модуля упругости для рассматриваемых образцов представлены на рис. 4.

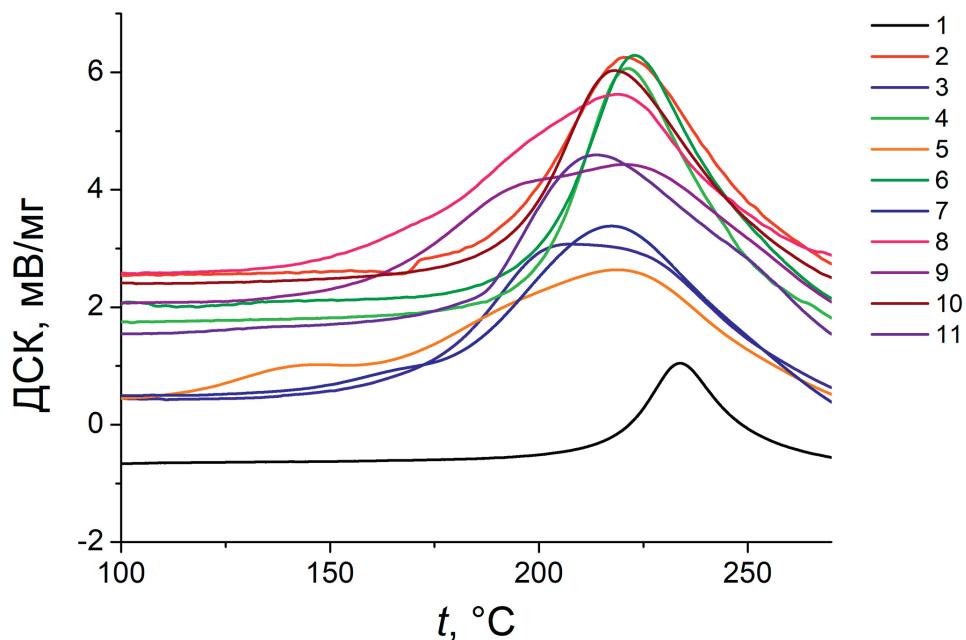


Рис. 4. Температурные зависимости модуля упругости

Fig. 4. Temperature dependences of the elastic modulus

Значение модуля упругости определяли при температуре 30 °C (табл. 2).

Табл. 2. Модуль упругости образцов при 30 °C

Table 2. Elastic modulus of the samples at 30 °C

Образец	<i>E</i> , МПа
АБС	1000 ± 40
АБС + 15 % (масс.) УВ	1300 ± 60
АБС + 30 % (масс.) УВ	1750 ± 50
АБС + 5 % (масс.) НЧ	1080 ± 30
АБС + 15 % (масс.) НЧ	850 ± 40
АБС градиентный	1650 ± 70

Результаты испытаний показывают, что модуль упругости образца АБС составляет 1000 ± 40 МПа и будет рассматриваться как базовый уровень для оценки влияния различных добавок и армирующих элементов на механические свойства материала. При добавлении УВ модуль упругости увеличивается в 1.3 и 1.75 раза при 15- и 30 %-ном содержании волокон соответственно, что свидетельствует о значительном улучшении жесткости и устойчивости к динамическим нагрузкам. Армирование образца УВ не только повышает модуль упругости по сравнению с АБС, но и делает материал более подходящим для применения в условиях, требующих высокой прочности и долговечности срока службы материалов, например, в автомобильной и авиационной промышленности. Добавление к АБС 5 % магнитных НЧ практически не влияет на значения модуля упругости ($E = 1080 \pm 30$ МПа), тогда как повышение содержания НЧ до 15 % приводит к снижению значения E до 850 ± 40 МПа. Это подчеркивает важность оптимизации содержания добавок для достижения желаемых

механических свойств. Значение модуля упругости для градиентного образца сопоставимо с таковым для образца с 30 %-ным содержанием УВ и свидетельствует об оптимальном сочетании жесткости и пластичности в нем.

Согласно данным рис. 5, АБС-пластик, армированный 30 % УВ, демонстрирует наивысшее значение пика модуля потерь, достигающий 330 МПа, что свидетельствует о выдающихся динамических механических характеристиках материала и его высокой способности к поглощению энергии и вибраций.

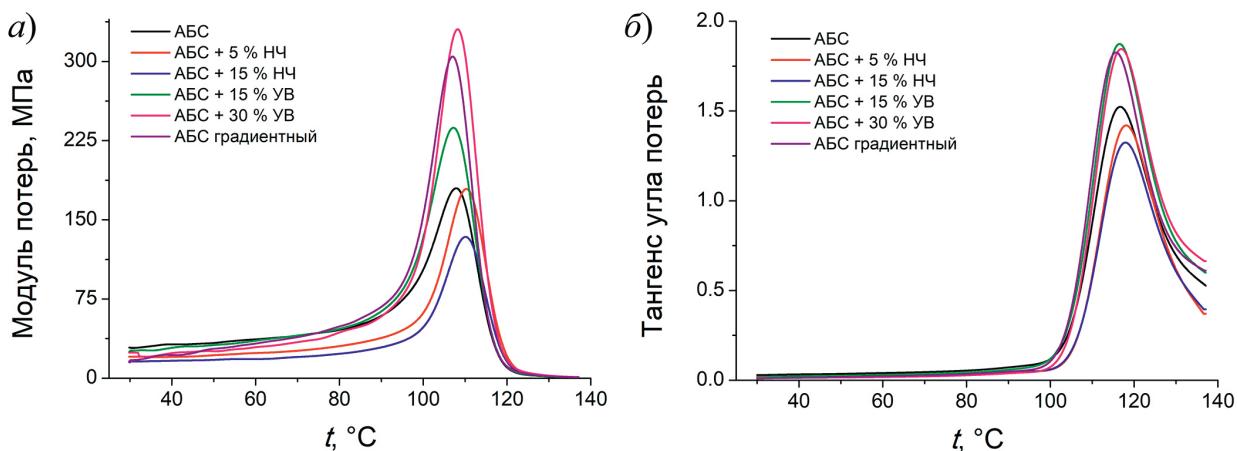


Рис. 5. Модуль потерь (а) и тангенс угла потерь (б) для исследуемых материалов

Fig. 5. Loss modulus (a) and loss tangent (b) for the materials under study

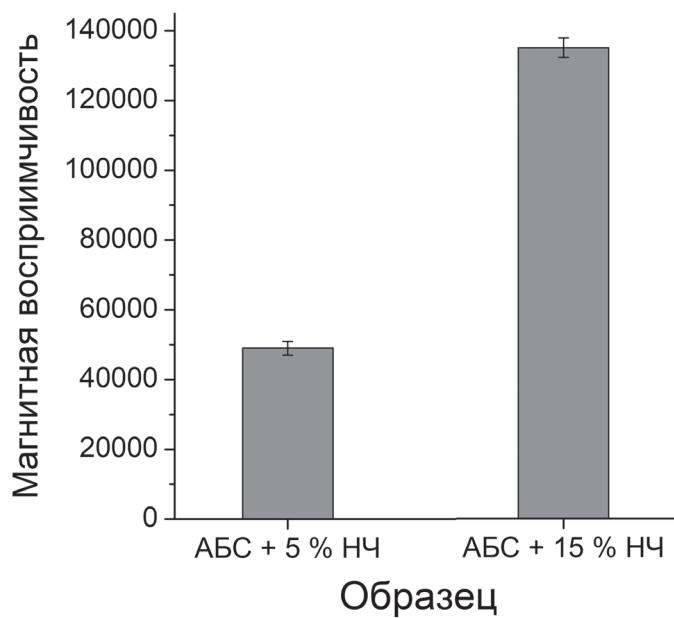
Градиентный материал показывает сопоставимое значение модуля потерь, приблизительно 304 МПа, что указывает на его близость по характеристикам к АБС, армированному 30 % УВ. АБС, армированный 15 % УВ, демонстрирует модуль потерь на уровне 240 МПа, что также подтверждает его хорошие свойства в контексте поглощения энергии и вибраций. В то же время АБС без добавок и полимер с добавлением 5 % НЧ показывают среднее значение модуля потерь 180 МПа, что указывает на отсутствие ухудшения характеристик при добавлении 5 % НЧ по сравнению с чистым материалом. Образец, содержащий 15 % НЧ, демонстрирует самые низкие значения модуля потерь, не превышающие 135 МПа, что указывает на ухудшение свойств поглощения энергии при высоком содержании наночастиц.

2.4. Определение механических свойств при ударе проводили для трех типов образцов (АБС, АБС, армированного 30 % УВ, и градиентного АБС) согласно ГОСТ 19109-84 [29]. Каждый тип был представлен в количестве шести единиц для обеспечения достаточного объема выборки и получения статистически значимых результатов. Полученные данные (табл. 3), позволяют сделать вывод о прочности и устойчивости различных типов материалов при ударных нагрузках. АБС демонстрирует высокую способность противостоять ударным нагрузкам. Для АБС, армированного 30 % УВ, наблюдается значительное уменьшение работы разрушения и ударной вязкости, что указывает на ухудшение ударопрочности, несмотря на улучшение модуля Юнга. Градиентный АБС показывает промежуточные значения, свидетельствующие об оптимальном сочетании высокой жесткости и хорошей ударопрочности.

Табл. 3. Результаты испытаний образцов на удар**Table 3.** Impact testing of the samples

Образец	Работа разрыва, Дж	Ударная вязкость, кДж/м ²
АБС	2.2 ± 0.2	54 ± 1
АБС + 30 % УВ	0.8 ± 0.2	20 ± 1
Градиентный АБС	1.4 ± 0.4	33 ± 1.5

2.5. Магнитная восприимчивость композита. Объемная магнитная восприимчивость является эффективным инструментом для сравнения магнитных свойств различных материалов независимо от их массы или объема. Результаты ее измерения для двух образцов с различным содержанием НЧ Fe_3O_4 представлены на рис. 6.

**Рис. 6.** Магнитная восприимчивость образцов АБС, содержащих НЧ Fe_3O_4 **Fig. 6.** Magnetic susceptibility of the ABS samples containing Fe_3O_4 NPs

Увеличение содержания НЧ ожидаемо привело к значительному (на 175 %) росту магнитной восприимчивости, что подчеркивает перспективность использования композитов, усиленных магнитными НЧ в приложениях, которые требуют улучшенных магнитных характеристик, например, в области интеллектуальной робототехники, сенсорных устройств и передовых электронных систем.

После проведения необходимых расчетов стандартного отклонения магнитной восприимчивости образцов и коэффициента вариации, установлено, что стандартное отклонение в случае АБС, наполненного на 5 и 15 % магнитными НЧ, составляет 2369 и 3085 соответственно, а коэффициенты вариации – 4.83 и 2.29 %. Эти результаты подтверждают близость полученных значений параметра в серии испытаний к среднему арифметическому для каждого образца. Величины коэффициентов вариации свидетельствуют о большей однородности материала при добавлении 15 % магнитных НЧ.

2.6. Проектирование функционально-градиентной многослойной структуры для интеграции свойств в изделиях, напечатанных на 3D-принтере. С целью объединения магнитных и механических свойств в одной интегрированной системе с использова-

нием 3D-печати был изготовлен образец композита с функционально-градиентной структурой, состоящий из пяти слоев (см. раздел 1.3.). Градиент выбран с учетом межслойной адгезии и поведения материалов при печати. Вследствие различия в микроструктуре и поверхностных характеристиках материалов АБС с магнитными НЧ показывает слабую адгезию при прямом контакте с АБС, армированным УВ. Поэтому в структуру включена промежуточная прослойка из чистого АБС, которая действует как буфер, снижая резкие переходы в свойствах и обеспечивая более однородное межслойное соединение, что улучшает общую структурную стабильность.

Такой подход иллюстрирует концепцию «функционально-градиентных материалов», в которых свойства изменяются постепенно для достижения комплексной функциональности. Подобные конструкции предназначены для создания интеллектуальных многозадачных изделий, пригодных для использования в робототехнике, авиационных конструкциях и сложных инженерных системах. Функциональное распределение свойств в предложенной структуре позволяет объединить магнитные характеристики в нижней части с высокой механической прочностью в верхней, обеспечивая гибкость проектирования и повышенную эксплуатационную эффективность.

2.7. Разработка технологического процесса производства изделия методом 3D-печати. Градиентный многослойный АБС-материал, используемый в проектировании различных частей роботов (рис. 7), таких как ноги, руки и суставы, сочетает преимущества различных слоев, каждый из которых выполняет специфическую функцию для повышения общей эффективности конструкции.

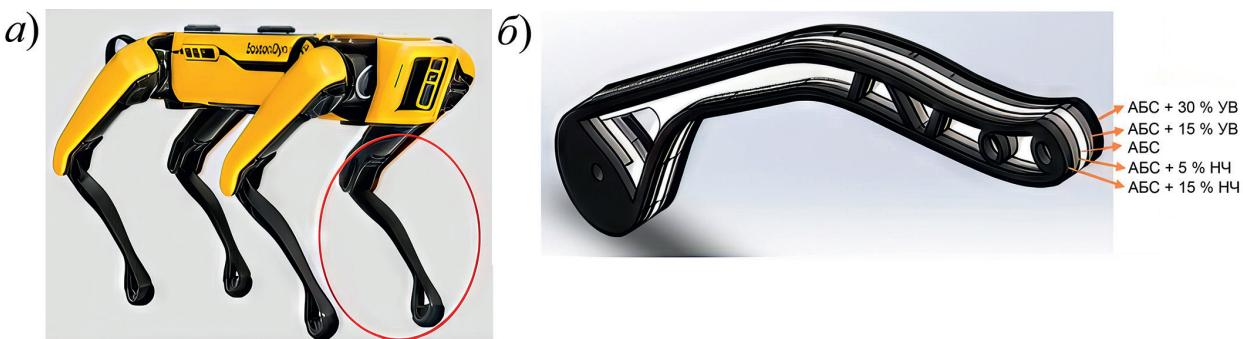


Рис. 7. Робот Boston Dynamics Spot (a), печатаемая деталь и градация слоев в ней (б)

Fig. 7. Boston Dynamics Spot robot (a), printable part and layer gradation in it (b)

Так, два слоя, армированные 30 и 15 % УВ соответственно, обеспечивают прочность и жесткость, что имеет критическое значение для стабильности и выносливости роботизированных конечностей, позволяя им выдерживать большие нагрузки и динамические воздействия. Средний слой из АБС играет ключевую роль в равномерном распределении напряжений и сил по всей детали, что помогает предотвратить локальные повреждения и продлевает срок службы изделия. Слои, содержащие магнитные НЧ в концентрациях 5 и 15 % соответственно, значительно повышают способность робота взаимодействовать с магнитными полями. Это не только улучшает точность его движений, но и открывает новые возможности для выполнения сложных задач в различных условиях эксплуатации. Таким образом, предложенный подход к проектированию структуры деталей позволяет создавать робототехнические устройства, способные адаптироваться к меняющимся требованиям и условиям работы.

Для создания 3D-модели детали использовано программное обеспечение Solidworks, позволяющее формировать серию 2D-срезов, которые являются слоями для 3D-печати. После завершения подготовки модели к печати, деталь (рис. 8) была распечатана на 3D-принтере с использованием параметров, указанных в табл. 4.



Рис. 8. Напечатанная деталь

Fig. 8. Printed part

Табл. 4. Основные настройки 3D-печати

Table 4. Basic 3D printing settings

Параметр настройки	Значение
Диаметр сопла	0.4 мм
Скорость печати	40 мм/с
Температура сопла	240 °C
Температура стола	100 °C
Высота слоя	0.15 мм
Толщина 1 слоя	0.15 мм
Толщина стенки (для полых моделей)	0.8 мм
Плотность заполнения	100 %

Заключение

Проведенное исследование показало возможность использования 3D-печати по технологии ФГМ для получения градиентного материала на основе АБС-пластика с добавлением различных по природе и содержанию функциональных добавок. Введение в полимер коротких УВ приводит, в основном, к заметному повышению механических характеристик, включая твердость и модуль упругости. Несмотря на то, что ударопрочность градиентного материала несколько ниже, чем у АБС, она превосходит таковую у материала с высоким наполнением УВ. Добавление магнитных НЧ увеличивает температуры плавления и стеклования материала, а также придает ему магнитные свойства. Таким образом, несмотря на присутствие ненаполненного слоя в центре слоистой конструкции градиентного материала, его механические характеристики близки к идеальным для армированного материала. Это можно объяснить тем, что упругий слой в центре материала равномерно распределяет напряжения, предотвращая их концентрацию в отдельных точках. В результате для градиентного материала достигается более высокая ударопрочность по сравнению с гомогенно армированными аналогами. Полученные в работе результаты демонстрируют возможность успешного применения использованного подхода к конструированию материалов, для которых имеет значение сочетание механической прочности и ударной вязкости. Такие матери-

алы востребованы в производстве конструкционных элементов для автомобильной, авиационной, медицинской и электротехнической промышленности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. *Yadav S., Liu S., Singh R.K., Sharma A.K., Rawat P.* A state-of-art review on functionally graded materials (FGMs) manufactured by 3D printing techniques: Advantages, existing challenges, and future scope // *J. Manuf. Processes.* 2024. V. 131. P. 2051–2072. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.026>.
2. *Oxman N., Keating S., Tsai E.* Functionally graded rapid prototyping // *Bártolo P.J., de Lemos A.C.S., Tojeira A.P.O., Pereira A.M.H., Mateus A.J., Mendes A.L.A., dos Santos C., Freitas D.M.F., Bártolo H.M., de Amorim Almeida H., dos Reis I.M., Dias J.R., Domingos M.A.N., Alves N.M.F., Pereira R.F.B., Patrício T.M.F., Fereira T.M.D. (Eds.) Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping.* Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. P. 483–489.
3. *Kawasaki A., Watanabe R.* Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials // *Ceram. Int.* 1997. V. 23, No 1. P. 73–83. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)00143-3](https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)00143-3).
4. *Studart A.R., Libanori R., Erb R.M.* Functional gradients in biological composites // *Ruiz-Molina D., Novio F., Roscini C. (Eds.) Bio- and Bioinspired Nanomaterials.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2014. P. 335–368. <https://doi.org/10.1002/9783527675821.ch13>.
5. *Liu Z., Meyers M.A., Zhang Z., Ritchie R.O.* Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications // *Prog. Mater. Sci.* 2017. V. 88. P. 467–498. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.013>.
6. *Ren L., Wang Z., Ren L., Han Z., Liu Q., Song Z.* Graded biological materials and additive manufacturing technologies for producing bioinspired graded materials: An overview // *Composites, Part B.* 2022. V. 242. Art. 110086. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110086>.
7. *Koizumi M.* FGM activities in Japan // *Composites, Part B.* 1997. V. 28, Nos 1–2. P. 1–4. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9).
8. *Gottron J., Harries K.A., Xu Q.* Creep behaviour of bamboo // *Constr. Build. Mater.* 2014. V. 66. P. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.024>.
9. *Kieback B., Neubrand A., Riedel H.* Processing techniques for functionally graded materials // *Mater. Sci. Eng: A.* 2003. V. 362, Nos 1–2. P. 81–106. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00578-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00578-1).
10. *Loh G.H., Pei E., Harrison D., Monzón M.D.* An overview of functionally graded additive manufacturing // *Addit. Manuf.* 2018. V. 23. P. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.023>.
11. *Zhang C., Chen F., Huang Z., Jia M., Chen G., Ye Y., Lin Y., Liu W., Chen B., Shen Q., Zhang L., Lavernia E.J.* Additive manufacturing of functionally graded materials: A review // *Mater. Sci. Eng.: A.* 2019. V. 764. Art. 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
12. *Qiu Z., Hu Y., Zhang J., Chen X., Liu J.* FGAM: A pluggable light-weight attention module for medical image segmentation // *Comput. Biol. Med.* 2022. V. 146. Art. 105628. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105628>.
13. *Vargas J.H., Westerlind H., Silfwerbrand J.* Grading material properties in 3D printed concrete structures // *Nord. Concr. Res.* 2022. V. 66, No 1. P. 73–89. <https://doi.org/10.2478/ncr-2022-0004>.
14. *Oxman N.* Variable property rapid prototyping: Inspired by nature, where form is characterized by heterogeneous compositions, the paper presents a novel approach to layered manufacturing entitled variable property rapid prototyping // *Virtual Phys. Prototyping.* 2011. V. 6, No 1. P. 3–31. <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.558588>.

15. Pei E., Loh G.H., Harrison D., Almeida H.D.A., Monzón Verona M.D., Paz R. A study of 4D printing and functionally graded additive manufacturing // Assem. Autom. 2017. V. 37, No 2. P. 147–153. <https://doi.org/10.1108/AA-01-2017-012>.
16. Compton B.G., Lewis J.A. 3D-printing of lightweight cellular composites // Adv. Mater. 2014. V. 26, No 34. P. 5930–5935. <https://doi.org/10.1002/adma.201401804>.
17. Dzemko M., Engelmann B., Hartmann J., Schmitt J. Toward shifted production strategies through additive manufacturing: A technology and market review for changing value chains // Procedia CIRP. 2019. V. 86. P. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.029>.
18. Fidan I., Imeri A., Gupta A., Hasanov S., Nasirov A., Elliott A., Alifui-Segbaya F., Nanami N. The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. V. 102, Nos 5–8. P. 1801–1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03269-7>.
19. Liu G., Zhang X., Chen X., He Y., Cheng L., Huo M., Yin J., Hao F., Chen S., Wang P., Yi S., Wan L., Mao Z., Chen Z., Wang X., Cao Z., Lu J. Additive manufacturing of structural materials // Mater. Sci. Eng., R. 2021. V. 145. Art. 100596. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.
20. Aremu A.O., Brennan-Craddock J.P.J., Panesar A., Ashcroft I.A., Hague R.J.M., Wildman R.D., Tuck C. A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing // Addit. Manuf. 2017. V. 13. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.006>.
21. Forés-Garriga A., Gómez-Gras G., Pérez M.A. Mechanical performance of additively manufactured lightweight cellular solids: Influence of cell pattern and relative density on the printing time and compression behavior // Mater. Des. 2022. V. 215. Art. 110474. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110474>.
22. Choi J.-W., Kim H.-C., Wicker R. Multi-material stereolithography // J. Mater. Process. Technol. 2011. V. 211, No 3. P. 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.003>.
23. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges // J. Manuf. Mater. Process. 2022. V. 6, No 1. Art. 4. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>.
24. Tammas-Williams S., Todd I. Design for additive manufacturing with site-specific properties in metals and alloys // Scr. Mater. 2017. V. 135. P. 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.030>.
25. Birman V., Byrd L.W. Modelling and analysis of functionally graded materials and structure // Appl. Mech. Rev. 2007. V. 60, No 5. P. 195–216. <https://doi.org/10.1115/1.2777164>.
26. Shanmugavel P., Bhaskar G.B., Chandrasekaran M., Mani P.S., Srinivasan S.P. An overview of fracture analysis in functionally graded materials // Eur. J. Sci. Res. 2012. V. 68, No 3. P. 412–439.
27. ASTM E1640-94. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Dynamic Mechanical Analysis. West Conshohocken, PA: ASTM Int., 1994. 5 p.
28. ГОСТ 4647–2015. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. М.: Стандартинформ, 2017. 18 с.
29. ГОСТ 19109-84. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду. М.: Издательство стандартов, 1984. 9 с.

References

1. Yadav S., Liu S., Singh R.K., Sharma A.K., Rawat P. A state-of-art review on functionally graded materials (FGMs) manufactured by 3D printing techniques: Advantages, existing challenges, and future scope. *J. Manuf. Processes*, 2024, vol. 131, pp. 2051–2072. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.026>.
2. Oxman N., Keating S., Tsai E. Functionally graded rapid prototyping. In: Bártolo P.J., de Lemos A.C.S., Tojeira A.P.O., Pereira A.M.H., Mateus A.J., Mendes A.L.A., dos Santos C., Freitas D.M.F., Bártolo H.M., de Amorim Almeida H., dos Reis I.M., Dias J.R., Domingos M.A.N.,

- Alves N.M.F., Pereira R.F.B., Patrício T.M.F., Fereira T.M.D. (Eds.) *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011, pp. 483–489.
3. Kawasaki A., Watanabe R. Concept and P/M fabrication of functionally graded materials. *Ceram. Int.*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 73–83. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)00143-3](https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)00143-3).
 4. Studart A.R., Libanori R., Erb R.M. Functional gradients in biological composites. In: Ruiz-Molina D., Novio F., Roscini C. (Eds.) *Bio- and Bioinspired Nanomaterials*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag, 2014, pp. 335–368. <https://doi.org/10.1002/9783527675821.ch13>.
 5. Liu Z., Meyers M.A., Zhang Z., Ritchie R.O. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications. *Prog. Mater. Sci.*, 2017, vol. 88, pp. 467–498. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.013>.
 6. Ren L., Wang Z., Ren L., Han Z., Liu Q., Song Z. Graded biological materials and additive manufacturing technologies for producing bioinspired graded materials: An overview. *Composites, Part B*, 2022, vol. 242, art. 110086. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110086>.
 7. Koizumi M. FGM activities in Japan. *Composites, Part B*, 1997, vol. 28, nos. 1–2, pp. 1–4. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9).
 8. Gottron J., Harries K.A., Xu Q. Creep behaviour of bamboo. *Constr. Build. Mater.*, 2014, vol. 66, pp. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.024>.
 9. Kieback B., Neubrand A., Riedel H. Processing techniques for functionally graded materials. *Mater. Sci. Eng: A*, 2003, vol. 362, nos. 1–2, pp. 81–106. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00578-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00578-1).
 10. Loh G.H., Pei E., Harrison D., Monzón M.D. An overview of functionally graded additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 23, pp. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.023>.
 11. Zhang C., Chen F., Huang Z., Jia M., Chen G., Ye Y., Lin Y., Liu W., Chen B., Shen Q., Zhang L., Lavernia E.J. Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Mater. Sci. Eng.: A*, 2019, vol. 764, art. 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
 12. Qiu Z., Hu Y., Zhang J., Chen X., Liu J. FGAM: A pluggable light-weight attention module for medical image segmentation. *Comput. Biol. Med.*, 2022, vol. 146, art. 105628. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105628>.
 13. Vargas J.H., Westerlind H., Silfwerbrand J. Grading material properties in 3D printed concrete structures. *Nord. Concr. Res.*, 2022, vol. 66, no. 1, pp. 73–89. <https://doi.org/10.2478/ncr-2022-0004>.
 14. Oxman N. Variable property rapid prototyping: Inspired by nature, where form is characterized by heterogeneous compositions, the paper presents a novel approach to layered manufacturing entitled variable property rapid prototyping. *Virtual Phys. Prototyping*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 3–31. <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.558588>.
 15. Pei E., Loh G.H., Harrison D., Almeida H.D.A., Monzón Verona M.D., Paz R. A study of 4D printing and functionally graded additive manufacturing. *Assem. Autom.*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 147–153. <https://doi.org/10.1108/AA-01-2017-012>.
 16. Compton B.G., Lewis J.A. 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv. Mater.*, 2014, vol. 26, no. 34, pp. 5930–5935. <https://doi.org/10.1002/adma.201401804>.
 17. Dzemko M., Engelmann B., Hartmann J., Schmitt J. Toward shifted production strategies through additive manufacturing: A technology and market review for changing value chains. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 86, pp. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.029>.
 18. Fidan I., Imeri A., Gupta A., Hasanov S., Nasirov A., Elliott A., Alifui-Segbaya F., Nanami N. The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 102, nos. 5–8, pp. 1801–1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03269-7>.
 19. Liu G., Zhang X., Chen X., He Y., Cheng L., Huo M., Yin J., Hao F., Chen S., Wang P., Yi S., Wan L., Mao Z., Chen Z., Wang X., Cao Z., Lu J. Additive manufacturing of structural materials. *Mater. Sci. Eng., R*, 2021, vol. 145, art. 100596. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>.

20. Aremu A.O., Brennan-Craddock J.P.J., Panesar A., Ashcroft I.A., Hague R.J.M., Wildman R.D., Tuck C. A voxel-based method of constructing and skinning conformal and functionally graded lattice structures suitable for additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 2017, vol. 13, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.006>.
21. Forés-Garriga A., Gómez-Gras G., Pérez M.A. Mechanical performance of additively manufactured lightweight cellular solids: Influence of cell pattern and relative density on the printing time and compression behavior. *Mater. Des.*, 2022, vol. 215, art. 110474. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110474>.
22. Choi J.-W., Kim H.-C., Wicker R. Multi-material stereolithography. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, vol. 211, no. 3, pp. 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.003>.
23. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. *J. Manuf. Mater. Process.*, 2022, vol. 6, no. 1, art. 4. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>.
24. Tammas-Williams S., Todd I. Design for additive manufacturing with site-specific properties in metals and alloys. *Scr. Mater.*, 2017, vol. 135, pp. 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.030>.
25. Birman V., Byrd L.W. Modelling and analysis of functionally graded materials and structure. *Appl. Mech. Rev.*, 2007, vol. 60, no. 5, pp. 195–216. <https://doi.org/10.1115/1.2777164>.
26. Shanmugavel P., Bhaskar G.B., Chandrasekaran M., Mani P.S., Srinivasan S.P. An overview of fracture analysis in functionally graded materials. *Eur. J. Sci. Res.*, 2012, vol. 68, no. 3, pp. 412–439.
27. ASTM E1640-94. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Dynamic Mechanical Analysis. West Conshohocken, PA, ASTM Int., 1994. 5 p.
28. State Standard 4647-2015. Plastics. A method for determining Charpy impact strength. Moscow, Standartinform, 2017. 18 p. (In Russian)
29. State Standard 19109-84. Plastics. Method for determination of Izod impact strength. Moscow, Izd. Standartov, 1984. 9 p. (In Russian)

Информация об авторах

Яхья Алиалшами, аспирант кафедры неорганической химии, Химический институт им. А.М. Бутлерова, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: yahiaalsami1995@gmail.com

Лилия Миниахмедовна Амирова, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры производства летательных аппаратов, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

E-mail: amirovaliliyam@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7605-2743>

Юлия Игоревна Журавлева, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры неорганической химии, Химический институт им. А.М. Бутлерова, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: yulialab6@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8756-3778>

Рустэм Рафаэльевич Амиров, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой неорганической химии, Химический институт им. А.М. Бутлерова, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: ramirov@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-0451>

Author Information

Yahya Alialshami, Postgraduate Student, Department of Inorganic Chemistry, A.M. Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University

E-mail: yahiaalsami1995@gmail.com

Liliya M. Amirova, Dr. Sci. (Chemistry), Full Professor, Department of Aircraft Production, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

E-mail: amirovaliliyam@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7605-2743>

Yulia I. Zhuravleva, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Department of Inorganic Chemistry, A.M. Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University

E-mail: yulialab6@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8756-3778>

Rustem R. Amirov, Dr. Sci. (Chemistry), Full Professor, Head of Department of Inorganic Chemistry, A.M. Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University

E-mail: ramirov@kpfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-0451>

Поступила в редакцию 28.06.2025

Received June 28, 2025

Принята к публикации 30.08.2025

Accepted August 30, 2025