

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 667 + 67.02

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.012

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Марина Камилевна Перлина¹, Константин Семенович Марикуца²,
Ирина Анатольевна Кириш³

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ). г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11

¹ pmka@mail.ru, ORCID - 0009-0008-0078-0349

² flexotech@yandex.ru, ORCID - 0009-0006-5623-2312

³ kirshia@mgupp.ru, ORCID - 0000-0003-3370-4226

Аннотация. В современном промышленном производстве активно внедряются новые полимерные композиционные материалы (ПКМ). Эти материалы, благодаря разнообразному сочетанию различных компонентов, обладают богатыми физико-механическими свойствами, включая высокую устойчивость к внешним факторам, температурным воздействиям и механическим нагрузкам, что обуславливает их широкое применение в различных отраслях.

Цель данной статьи состоит в изучении влияния ультразвуковой обработки на свойства ПКМ и оценке возможностей применения этой технологии для улучшения эксплуатационных характеристик материалов. Авторы видят приоритет в демонстрации потенциальных возможностей использования ультразвука для улучшения качества и функциональных характеристик ПКМ, ещё более расширяя промышленные сегменты его использования.

Задачи исследования включают:

1. Обзор современных тенденций и требований к качеству и функционалу ПКМ.
2. Анализ методов модификации ПКМ с точки зрения экологии, экономики и техники.
3. Оценка значимости выбора связующего для формирования свойств ПКМ.
4. Определение актуальных требований к ПКМ в сфере полиграфии и критерии оценки качества покрытий.

Методология исследования материала основана на систематическом анализе и синтезе актуальных научных и технических литературных источников, посвященных полимерным композиционным материалам.

Основные результаты обзора показывают, что:

- ПКМ легко адаптируются к разным условиям эксплуатации, а их модификация расширяет функциональность.
- Важно учитывать механизмы разрушения и проводить соответствующие испытания.
- Растёт потребность в экологически чистых, дешёвых и безопасных композитах, особенно важных для отраслей вроде полиграфии. Выводы статьи указывают на стратегическую важность полимерных композиционных материалов для инновационного развития промышленности. Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований, оптимизации производственных процессов и материалов для конкретных прикладных задач, способствуя созданию более эффективных и безопасных продуктов.

Ключевые слова: Полиграфическое производство, полимерные композиционные материалы, физико-механические свойства, материалы промышленного назначения, экологичность и экономичность, функциональные возможности.

Для цитирования: Перлина М.К., Марикуца К.С., Кириш И.А. К вопросу применения ультразвуковой обработки для полимерных полиграфических композиций // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 497-509. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.012.

Original article

ON THE APPLICATION OF ULTRASONIC PROCESSING TO POLYMERIC PRINTING COMPOSITES

Marina K. Perlina ¹, Konstantin S. Marikutsa ², Irina A. Kirsch ³

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH). Moscow, Volokolamsk highway, 11

¹ pmka@mail.ru, ORCID - 0009-0008-0078-0349

² flexotech@yandex.ru, ORCID - 0009-0006-5623-2312

³ kirshia@mgupp.ru, ORCID - 0000-0003-3370-4226

Abstract. New polymer composite materials (PCM) are being actively introduced in modern industrial production. Due to the diverse combination of various components, these materials have rich physical and mechanical properties, including high resistance to external factors, temperature influences and mechanical loads, which determines their wide application in various industries.

The purpose of this article is to study the effect of ultrasonic treatment on the properties of PCM and to evaluate the possibilities of using this technology to improve the performance of materials. The authors see a priority in demonstrating the potential of using ultrasound to improve the quality and functional characteristics of PCMs, further expanding the industrial segments of its use.

Research objectives include:

1. Overview of current trends and requirements for the quality and functionality of PCMs.
2. Analysis of the methods of modification of PCM from the point of view of ecology, economics and technology.
3. Assessment of the significance of the choice of a binder for the formation of the properties of PCM.
4. Definition of current requirements for PCMs in the field of printing and criteria for evaluating the quality of coatings.

The methodology of the material research is based on a systematic analysis and synthesis of relevant scientific and technical literature sources on polymer composite materials.

The main results of the review show that:

- PCMs can easily adapt to different operating conditions, and their modification expands the functionality.
- It is important to take into account the mechanisms of destruction and conduct appropriate tests.
- There is a growing need for environmentally friendly, cheap and safe composites, especially important for industries like printing. The conclusions of the article indicate the strategic importance of polymer composite materials for the innovative development of industry. The data obtained can serve as a basis for further research, optimization of production processes and materials for specific applications, contributing to the creation of more efficient and safer products.

Keywords: Printing, polymer composite materials, physical and mechanical properties, industrial materials, environmental friendliness and cost-effectiveness, functionality.

For citation: Perlina M.K., Marikutsa K.S. & Kirsch I.A. (2025). On the Application of Ultrasonic Processing to Polymeric Printing Composites. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 497-509. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.012.

Введение

Стремительное развитие современных технологий вызывает глубокое преобразование во всех отраслях производства. Появляются новые эффективные технологии, позволяющие внедрять в передовые научные разработки, используя новые материалы. Одним из важнейших направлений развития выступает область полимерных композиционных материалов (ПКМ), широко применяемых в различных секторах промышленности благодаря своим уникальным

физико-механическим свойствам, таким как прочность, стойкость к износу и длительный срок службы.

В настоящее время полимерные композиты привлекают пристальное внимание ученых и разработчиков ввиду их способности адаптироваться к специфическим требованиям конкретных сфер применения. Вместе с тем возникает ряд проблем, связанных с достижением баланса между эксплуатационными характеристиками и себестоимостью, а также созданием надежных

методов контроля качества и проверки надежности.

Несмотря на очевидные успехи, существующие технологии пока не позволяют достичь необходимого уровня эксплуатационных характеристик, устойчивого к экстремальным условиям внешней среды. Понимание механизма влияния модифицирующих факторов, таких как ультразвуковая обработка, открывает путь к повышению конкурентоспособности и экологической безопасности полимерных композиционных материалов.

Данная статья направлена на изучение влияния ультразвуковой обработки на физико-механические свойства полимерных композиционных материалов, а также оценку потенциала этой технологии для усовершенствования эксплуатационных характеристик полимерных покрытий и клеевых соединений.

Полимерная отрасль России и промышленность развитых стран мира производят в больших количествах полимерные материалы, обладающие различными физическими, технологическими и эксплуатационными свойствами. Им присущи высокая прочность, минимальная плотность, долговечность, универсальность применения и т.д. Именно благодаря этим свойствам полимерные материалы получили широкое применение во всех областях человеческой деятельности. От покорения космических высот до бурения сверхглубинных скважин, от микроскопических деталей ЭВМ до гидроизоляции целых каналов и водохранилищ – всюду вынужден человек пользоваться полимерными материалами, конечно, разными, специально разработанными или подобранными для данного конкретного применения. [1]



Рисунок 1. Диаграмма, иллюстрирующая разнообразие областей применения полимерных композиционных материалов. [2]

Figure 1. Diagram illustrating the variety of applications of polymer composite materials. [2]

По своим свойствам полимерные композиционные материалы не уступают традиционным аналогам, а зачастую превосходят их. Они устойчивы к агрессивным средам, высокой температуре, колебаниям влажности и механическим воздействиям. Это делает производственную продукцию с использованием полимерных композиций долговечной, надежной и экономически эффективной.

Полимерные композиционные материалы, за счет возможности адаптации физико-механических характеристик к требованиям конкретного применения, нашли широкое применение в самых разных сферах – от повседневной жизни до химической, авиационной, космической, машиностроительной и многих других отраслей промышленности. [3]

Промышленное производство композиционных материалов стартовало в сороковых годах XX века. С тех пор эта отрасль пережила бурный рост, и сегодня композиты находят применение практически во всех сферах промышленности. В основе любого композиционного материала лежат два обязательных компонента: армирующий наполнитель (упрочнитель) и связующее вещество. [4]

Современные полимерные материалы являются многокомпонентными системами, в которых наряду с полимерной основой, присутствуют различные добавки меняющие их технологические возможности. Такие добавки изменяют структуру системы на молекулярном или надмолекулярном уровне. [5]

Полимерные добавки используют для сохранения и улучшения свойств полимеров. Сохранение свойств – это защита от негативных факторов, возникающих в течение всего жизненного цикла полимера.

Использование полимерной основы для создания многокомпонентных композитных материалов обусловлено тем, что полимеры, это очень «удобные» вещества. Химический состав полимеров – длинные цепочки мономерных звеньев, которые могут подвергаться различным воздействиям и не теряя основных физико-химических свойств вещества, варьировать его технологическо-производственные возможности в широких пределах.

Возможности синтетической полимерной химии позволяют создавать широкий спектр материалов, однако создание полимера, идеально подходящего для конкретного применения, часто упирается в необходимость одновременного учета множества противоречивых

требований к связующему. Например, задача достижения максимальной прочности композиционного материала и определения соответствующих характеристик связующего усложняется разнообразием механизмов разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ), а также потребностью в точном моделировании процесса разрушения и проведении испытаний, максимально приближенных к условиям эксплуатации изделия. [6]

Одним из ключевых отличий ПКМ от низкомолекулярных веществ является их способность к ориентации, приводящей к резкой анизотропии физических свойств. Это свойство позволяет создавать материалы с заданными характеристиками в различных направлениях. [7]

Для предотвращения потери прочности полимерные матрицы модифицируют с помощью различных добавок (дисперсных, волокнистых, ультрадисперсных). Ультразвуковая обработка является одним из перспективных методов структурной модификации полимеров, позволяющих улучшить их свойства. [8]

Требования к полимерным материалам можно разделить на три группы. При модификации, изменении условий, химической структуры, степени химической сшивки и прочего, стремясь улучшить и улучшая свойства одной группы, мы автоматически ухудшаем другие. К одной группе можно отнести прочность, жесткость, теплостойкость матрицы, к другой — пластичность, вязкость разрушения, трещиностойкость, ударную вязкость, перерабатываемость, технологичность связующего. [6]

Контроль надмолекулярной структуры полимера путем оптимизации количества введенного модификатора представляет собой экономически выгодный метод получения полимерных материалов с варьируемыми эксплуатационными характеристиками. [10]

Задача исследователя, конструирующего композиционный материал, — найти компромисс, как-то оптимизировать выбор связующего, учитывая, впрочем, еще и экологические, экономические, конъюнктурные и другие соображения. [6]

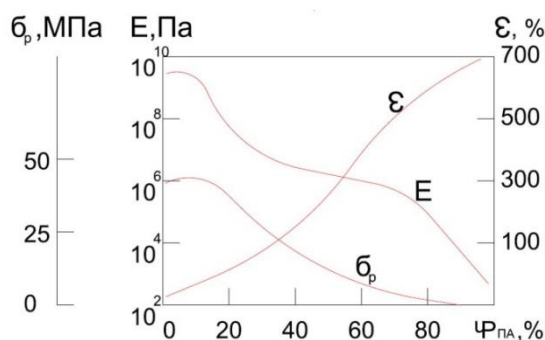


Рисунок 2. Влияние пластификатора на физико-механические свойства полимерного материала (ПВХ+диоктилфталат), зависимость различных параметров (модуль упругости, прочность, относительное удлинение и др.) от содержания пластификатора в полимере. [9]

Figure 2. The influence of the plasticizer on the physical and mechanical properties of the polymer material (PVC + dioctyl phthalate), the dependence of various parameters (elastic modulus, strength, relative elongation, etc.) on the content of the plasticizer in the polymer. [9]

Применение полимерных материалов в различных отраслях промышленности РФ, и в том числе, в полиграфической отрасли имеет ряд преимуществ. Высокая устойчивость к внешним воздействиям, термостойкость, устойчивость к УФ излучению позволяет использовать окрашенные или прозрачные полимерные слои для декорирования или защиты таких видов промышленной продукции как: окрашенная полимерная пленка получаемая выдувной или плоско-щелевой экструзией, окрашенная полимерная выдувная упаковка или полученная литьем под давлением, типографская краска для гибкой полимерной, многослойной, картонной упаковки и книжно-журнальной продукции, POS и POSM печатная продукция или самоклеящиеся этикетки, полимерные слои декорирующие наружную рекламную продукцию.

По распространённости полимерных материалов в полиграфическом производстве, самыми распространенными и наиболее остро реагирующими на любые внешние изменения являются полиграфические печатные краски. Следом идут полиграфические печатные лаки и различные функциональные покрытия. Далее следуют полиграфические и ламинационные клеи, релизы и прочие химические композиции, используемые для склеивания, декорирования или обработки различной полиграфической

продукции промышленным способом или для придания ей различных физико-химических свойств при дальнейшем использовании в технологическом процессе полиграфического, упаковочного или фасовочного производства или в конечном использовании в различных промышленных производственных процессах. [11]

Полиграфические печатные краски, полиграфические лаки, клеи и прочие полимерные химические составы, применяющиеся в полиграфическом и упаковочном производстве, должны отвечать определенным требованиям:

- Отсутствие вредных химических веществ, экологичность и безопасность при нанесении и последующем использовании в печатной продукции при контакте с конечным потребителем или окружающей средой;

- Технологичности и производственной применимости в полиграфическом процессе изготовления печатной продукции и последующих производственных и промышленных процессах;

- Повторяемости и предсказуемости использования в полиграфическом производственном процессе и в дальнейшем использовании;

- Приемлемой стоимости и доступности на внутреннем рынке РФ.

В полиграфическом производстве широко используются различные виды лаков и красок для создания яркой и качественной полиграфической, упаковочно-этикеточной и оформительно-декоративной печатной продукции. Пигментированные и прозрачные полиграфические краски и чернила позволяют получить высококачественные цветные изображения репродукционного качества, а специализированные надпечатные лаки (матовые, глянцевые, с эффектом «софт-тач», «песка» и проч.) оформляют полиграфическую продукцию дополнительными эффектами декорирования, придающими ей специальные производственные, эстетические и маркетинговые характеристики. Использование специальных лаков-релизов и лаков-праймеров позволяет изменять определенные физико-механические и, частично, химические свойства полиграфической продукции, когда стандартными способами невозможно придать запечатываемой поверхности необходимые печатно-технические свойства.

При рассмотрении полиграфических материалов на основе бумаги и картона следует отметить, что такая печатная продукция может

быть без полимерного покрытия и с покрытием, а также с пропиткой и без нее. Упаковочные материалы, которые получают путем сочетания целлюлозного материала (бумага, картон) с природными или синтетическими полимерами или металлическими покрытиями представляют собой комбинированные материалы. Целлюлозные композиционные материалы применяют для упаковки и сохранения пищевых продуктов, технических изделий, различных химических, лекарственных веществ и т.д. Целлюлозный компонент выполняет армирующие функции. Достоинствами целлюлозного компонента являются достаточно высокая прочность волокон основы, большая впитывающая способность, возобновляемая сырьевая база и способность подвергаться вторичной переработке. [12]

Полимерное покрытие играет роль дополнительного связующего материала, устраняет дефекты целлюлозного компонента, увеличивает механические свойства, повышает влагостойкость материала, придает ему специальные качества, например, жиростойкость, изменение барьерных свойств для газопроницаемости.

Также, в современной полиграфической промышленности используется огромное количество полимерных материалов в виде тонких пленок, как монопленок, так и многослойных материалов на основе полиэтилентерефталата, полипропилена, полиэтилена, полиамида, полистирола, поливинилхлорида и т.д. для изготовления гибкой упаковочной и этикеточной печатной продукции.

При изготовлении любого типа продукции, особенно упаковки, необходимо придание ей эстетической привлекательности, придания «продающего» эффекта. Основной проблемой современного полиграфического производства является невозможность перейти на новый уровень качества воспроизведения многокрасочной печатной продукции позволяющий получать воспроизводимое изображение с более высокими линейными и разрешающей способностью печати без ухудшения или уменьшения передаваемого диапазона градаций, и, как следствие, передаваемого количества тоновых переходов цветов.

Эта проблема описывалась и ранее, но попытки ее решения упирались в невозможность использования технологии изготовления полимерных композиций с заданными характеристиками. [13,14]

«Умные» материалы могут реагировать на раздражители и адаптировать свои реакции в зависимости от внешних сигналов из окружающей среды. Для такого поведения необходим способ эффективной передачи энергии, а затем ее преобразования для использования в таких приложениях, как приведение в действие, распознавание или передача сигналов. Ультразвук может безопасно передавать энергию с низкими потерями через сложные и непрозрачные среды. Его можно локализовать в небольших областях пространства и подключить к системам в широком диапазоне временных масштабов. Однако те же характеристики, которые позволяют ультразвуку эффективно распространяться в материалах, затрудняют преобразование акустической энергии в другие полезные формы. В последнее время в различных областях начали решать эту проблему, демонстрируя ультразвуковые эффекты, которые позволяют управлять физическими и химическими системами с удивительно высокой точностью. [15]

Развитие научных разработок прикладного характера позволяет подойти к решению этой проблемы с новой стороны – области использования энергии силового ультразвука. [16]

Разработанный Ольшанским Н.А. и Мордвиновой А.В. в 1958 году способ ультразвукового соединения полимерных материалов стал важным технологическим прорывом. Благодаря высокой производительности и универсальности, метод быстро получил широкое признание и распространение как в Советском Союзе, так и за его пределами. [17]

В последние годы изучается возможность использования ультразвука в качестве внешнего стимула для синтеза полимеров. Идея иницирования полимеризации ультразвуком была предложена ещё в 1951 году Линдстромом и др., которые полимеризовали акрилонитрил в воде под воздействием ультразвука без использования внешних инициаторов. Они описали образование радикалов $\bullet\text{ОН}$ под воздействием ультразвука, аналогичное механизму гомолиза воды под воздействием γ -излучения. Органические растворители также могут образовывать радикалы и иницировать полимеризацию, если они способны преодолеть порог кавитации. Таким образом, полимеризация под воздействием ультразвука не ограничивается только водными средами или водорастворимыми мономерами/полимерами.

Преимущества использования опосредованной ультразвуком полимеризации включают:

- 1) более высокую скорость полимеризации,
- 2) пониженную температуру полимеризации; несколько реакций, протекающих при более высоких температурах, могут быть проведены при температуре окружающей среды в присутствии ультразвука, например, термические инициаторы, такие как азобисизобутиронитрил (AIBN), который разлагается при 70°C , могут быть использованы при термостатировании в сочетании с ультразвуковым воздействием [18],

- 3) повышенная эффективность реакции; поскольку ультразвук не нуждается во внешних инициаторах или катализаторах, вероятность образования побочных продуктов снижается. являются низкими и увеличивают выход полимерного продукта;

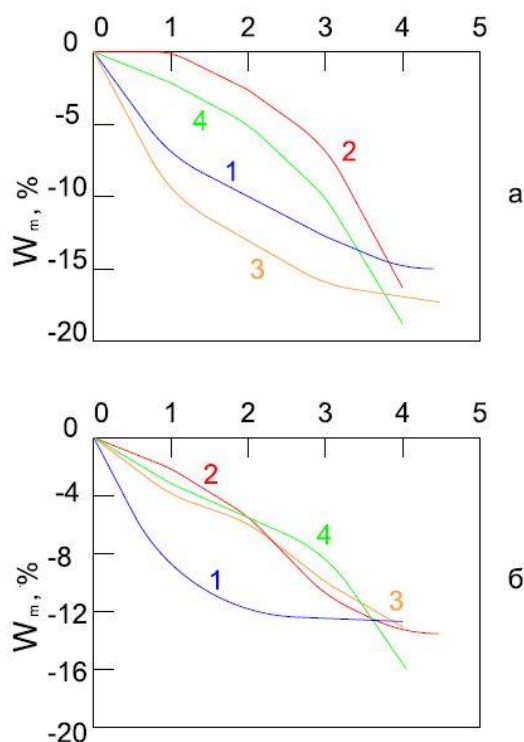
- 4) лучшее перемешивание и диспергирование; механическая сила, возникающая в процессе кавитации, обеспечивает лучшее диспергирование, что полезно при постполимеризационной обработке. Отсутствие внешних инициаторов или катализаторов, а также использование водной среды для полимеризации делают полимеризацию под воздействием ультразвука «экологичным» и «устойчивым процессом». [19]

Развитие ультразвуковой обработки стимулировало технологический прогресс, включая разработку усовершенствованного оборудования, новых методов исследований и инновационных технологических операций. Результаты многочисленных исследований подтверждают перспективность использования ультразвуковой обработки (УЗО) для улучшения качества полимеров и интенсификации процессов их переработки. Твердофазная технология, применяемая для переработки модифицированных полимерных материалов, демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными методами, обеспечивая повышенную технологичность, улучшенные эксплуатационные характеристики, экономическую эффективность, экологическую безопасность, отсутствие дефектов поверхности и улучшенные реологические свойства, такие как повышенная текучесть расплава. [20]

За последние годы появились разработки по использованию ультразвукового воздействия на полимерные композиции для придания

им новых, дополнительных физико-химических свойств.

Ультразвуковые волны, проходящие через разбавленный раствор высокомолекулярного полимера, инициируют процесс деструкции, характеризующийся уменьшением молекулярной массы. На молекулярном уровне этот процесс представляет собой механическую деструкцию, поскольку полимерные цепи подвергаются высокочастотным колебаниям. Возникающий локальный сдвиговый градиент приводит к разрыву полимерных цепей, что снижает среднюю молекулярную массу. Аналогично механической деструкции, уменьшение молекулярной массы прекращается при достижении определенного предельного значения, независимо от продолжительности воздействия ультразвука. При этом более длинные молекулы разрушаются быстрее, чем короткие. [21]



1-ПЭ УЗ, 2-ПЭ, 3-ПП УЗ, 4-ПП,
1-ПА УЗ, 2-ПА, 3-ПЭТФ УЗ, 4-ПЭТФ

Рисунок 3. Изменение молекулярной массы полимеров от количества циклов обработки УЗ (а – для ПЭ и ПП, б – для ПА и ПЭТФ). [22]

Figure 3. Change in the molecular weight of polymers depending on the number of ultrasound treatment cycles (a – for PE and PP, b – for PA and PET). [22]

Интенсивность воздействия ультразвука на расплавленные полимеры определяется свойствами полимера, в частности, его вязкостью. Более низкая вязкость приводит к менее выраженному изменению эффективной вязкости и структуры под воздействием ультразвука. Сравнение обработанных и необработанных образцов показывает, что ультразвуковая обработка снижает эффективную вязкость расплава. При многократном воздействии ультразвука происходит первоначальное снижение вязкости, за которым следует стабилизация этого параметра. [23]

При обработке полимерных материалов в ультразвуковом поле при постоянной частоте колебаний ультразвука 1 МГц и интенсивности поля 5 кВт/м² существенно изменяются физико-механические свойства композиций.

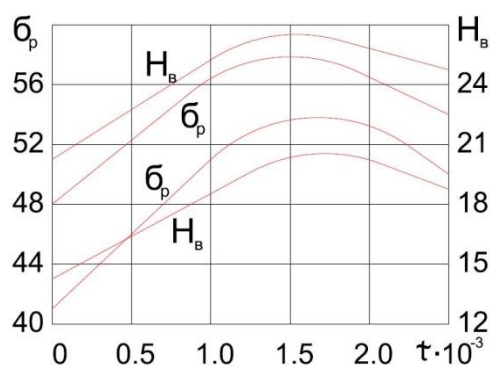


Рисунок 4. Зависимость прочности на разрыв (σ_p) и твердости (H_v) композиционных покрытий от времени воздействия ультразвукового поля. [24]

Figure 4. Dependence of tensile strength (σ_p) and hardness (H_v) of composite coatings on the time of exposure to an ultrasonic field. [24]

Как видно из рис.4 прочность на разрыв и микротвердость увеличиваются в 1,3-1,5 раз. Эти характеристики композиций достигают максимума при обработке ультразвуком продолжительностью 1200-1800 с, а затем практически остаются постоянными. Твердость композиций и их прочность на разрыв с увеличением времени обработки в ультразвуковом поле проходит через максимум, что коррелирует с изменением интенсивности изнашивания от времени обработки. Изменение свойств композиций под воздействием ультразвука, очевидно, связано с увеличением подвижности макромолекул и hv сегментов, интенсивности силовых давлений в межфазной границе, ускорением

процессов диффузии, а также уплотнением молекул полимера и композиции, вызываемого большими локальными давлениями и разряжениями от ультразвукового колебания. Кроме того, в случае применения наполнителей увеличивается смачиваемость полимера, расстояние между молекулами уменьшается настолько, что они входят в сферу межмолекулярного притяжения. Происходит диспергирование композиций и их структурирование. Протекают процессы дезагрегации и дегазации в композиции. Все это способствует увеличению плотности композиций и улучшению их свойств. [24]

Большинство работ проведенных за последние годы показали высокие перспективы использования ультразвука при получении полимерных композиций различной химической природы.

Таким образом, использование технологии воздействия ультразвука совместно с традиционными химическими методами видится крайне перспективным для формирования новых свойств полиграфических печатных лаков и красок. Например, диспергирование компонентов красок, повышение прочностных и других эксплуатационных свойств полимерных покрытий может быть достигнуто в результате ультразвуковой обработки покрытий на различных стадиях технологического процесса их формирования: до нанесения покрытия, в процессе формирования покрытия или путём воздействия после формирования покрытия. Адгезионная прочность покрытий, где ультразвуковое воздействие применяется для предварительной обработки олигомерной композиции, то есть до нанесения покрытия, имеет значительно большую адгезионную прочность.

Ультразвуковое воздействие на эпоксидные композиции частотой 22 кГц в процессе, предшествующем отверждению, приводит к формированию структуры, обеспечивающей повышение адгезионной прочности покрытия на 30,65% и увеличение долговечности на 50,65%. [25]

Ультразвуковая обработка расплавов термодинамически несовместимых полимеров (полиамид/полиэтилен и полипропилен/полиэтилентерефталат) приводит к расширению диапазона совместимости компонентов в смеси. Это связано с формированием особой фазовой структуры, диспергированием и, что наиболее важно, образованием сополимеров. Впервые показано образование сополимеров на

основе полиамида/полиэтилена и полипропилен/полиэтилентерефталата под воздействием ультразвука, предложены механизмы их образования. Предложена схема структурных изменений в смесях при ультразвуковой обработке. Оценено энергетическое взаимодействие полимеров. Доказано, что введение силанов в полиэтилентерефталат усиливает эффект ультразвуковой обработки, улучшая механические свойства композиций. Ультразвук ускоряет биоразложение композиций на основе вторичного полиэтилена с биоразлагаемым наполнителем, стимулируя окисление и формирование полярных групп. Полученные результаты открывают перспективы использования модифицированных ультразвуком полимерных композиций в качестве полимерных основ для полиграфических красок и лаков, в частности, для улучшения адгезии, прочности и экологичности покрытий.

Необходимы систематические исследования влияния ультразвуковой обработки на расплавы полимерных смесей различной химической природы, включая вторичные полимеры, поскольку на данный момент такие данные отсутствуют, как и информация об изменениях свойств, вызванных данным воздействием. [26]

Покрытия, отверждаемые УФ-излучением и ультразвуковым излучением, постоянно совершенствуются в связи с ужесточением экологических требований и норм. Покрытия, отверждаемые излучением, обладают рядом преимуществ, таких как низкое воздействие на окружающую среду, высокая скорость полимеризации и производительность. Чтобы удовлетворить спрос на матовые покрытия, способные подчеркнуть текстуру и поверхность, производителям и исследователям в области покрытий необходимо адаптироваться. Несмотря на то, что для создания эффективных покрытий было разработано множество процессов и технологий, достижение оптимального сочетания высоких механических характеристик и эстетики с низким уровнем блеска по-прежнему остаётся сложной задачей. [27]

Значительный научный и практический интерес вызывает разработка полимерных покрытий с градиентной структурой, отличающихся плавным изменением состава по толщине от верхнего слоя к подложке. Такая структура позволяет создавать материалы с заданными свойствами, изменяющимися в широком диапазоне. Несмотря на это, традиционный подход к

созданию градиентных покрытий, заключающийся в многократном послойном нанесении лакокрасочных материалов, имеет ряд недостатков, таких как много-стадийность, длительность и, что особенно важно, недостаточная адгезия между слоями. [28]

Ультразвуковая обработка полимерной композиции в различных агрегатных состояниях (расплав, раствор, дисперсия) перед нанесением на субстраты обеспечивает значительное повышение адгезионной прочности соединения. Параллельно увеличивается поверхностная энергия полимерного композитного материала. Кроме того, снижение вязкости (особенно актуально для композиций, наносимых типографскими способами) под воздействием ультразвука создает технологическое преимущество, позволяя осуществлять переработку материала при более низких температурах и сниженных энергетических затратах. [29]

Для достижения оптимальных результатов ультразвуковой обработки полимеров необходимо учитывать такие факторы, как: физико-механические свойства материала и геометрия субстратов и поверхностей участвующих в процессе. [30]

Изменение свойств покрытий по толщине обеспечивается в лаковом составе и при введении агентов, пигментов и наполнителей. На процесс расслоения влияют природа и концентрация компонентов, и параметры отверждения.

Исследования показали, что введение минеральных пигментов и наполнителей в полимерные системы (включая лаки, краски и покрытия) позволяет целенаправленно модифицировать широкий спектр их свойств, включая деформационно-прочностные, изолирующие, противокоррозионные и адгезионные характеристики. Кроме того, становится возможным создание составов со специализированными функциональными возможностями, такими как электропроводность, электроизоляция, термостойкость, огнезащита, изменение коэффициента трения и прочее. Эти модифицированные полимеры и покрытия находят широкое применение в различных отраслях, включая полиграфию, для создания печатных красок с улучшенными печатно-техническими свойствами и упаковку для обеспечения заданных барьерных свойств и защиты содержимого. Влияние пигментов и наполнителей определяется двумя ключевыми факторами:

- механическими и реологическими аспектами, связанными с заполнением полимерной матрицы нерастворимой фазой, и

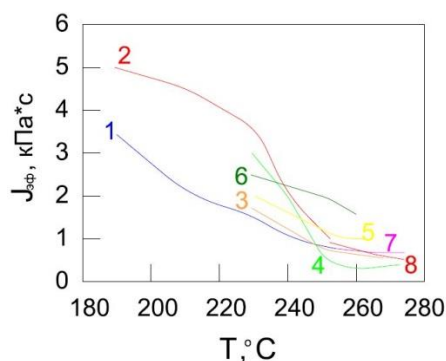
- физико-химическими взаимодействиями между частицами пигмента и/или агента и пленкообразователем. Структурные особенности наполненных систем в значительной степени определяются взаимодействием полимера с поверхностью пигментных частиц. [31]

Использование ультразвуковой обработки вязких композиций с высоким содержанием наполнителей и пигментов демонстрирует позитивное влияние на кинетику диспергирования и гомогенизации. Наблюдается тенденция к улучшению адгезионных свойств формируемого покрытия, а также повышение его устойчивости к эксплуатационным нагрузкам. [28]

В ходе сравнительного анализа полимерных композитных материалов с идентичным составом, изготовленных с использованием и без использования ультразвуковой обработки, установлено, что ультразвук повышает текучесть композиций. Методом электронной микроскопии показано, что ультразвуковая обработка способствует формированию материалов с более однородным распределением компонентов. Дополнительно, зафиксировано улучшение физико-механических свойств ПКМ, в особенности, наблюдается значительное увеличение относительного удлинения при разрыве (в 1,5-2 раза по сравнению с контролем). [32]

Разрушающее действие ультразвука на полимеры, как синтетические, так и природные, хорошо известно. Особый интерес представляет ультразвуковая обработка природных полимеров, поскольку её применение часто приводит к более эффективной переработке натурального сырья в ценные продукты и химикаты. [33]

Повышение температуры ускоряет разрушение полимерных материалов. Увеличение температуры снижает вязкость полимерных покрытий, но ультразвуковая обработка минимизирует это снижение.



1-ПЭ УЗ, 2-ПЭ, 3-ПП УЗ, 4-ПП, 5-ПА УЗ, 6-ПА, 7-ПЭТФ УЗ, 8-ПЭТФ

Рисунок 5. Зависимость эффективной вязкости от температуры для полимеров, полученных при воздействии УЗ (1,3,5,7) и в его отсутствии (2,4,6,8) при влиянии нескольких факторов (механического, структурного, в меньшей степени – кавитационного). [26]

Figure 5. The dependence of effective viscosity on temperature for polymers obtained under the influence of ultrasonic (1,3,5,7) and in its absence (2,4,6,8) under the influence of several factors (mechanical, structural, and to a lesser extent cavitation). [26]

Предполагается, что ультразвук, особенно при высоких температурах, может способствовать воссоединению молекул, что может быть использовано для создания новых материалов, объединяющих разные полимеры. При этом ультразвук практически не меняет размер молекул и содержание кислородных групп в полимере, что хорошо скажется на физико-химических свойствах полиграфических лаков, не изменяя их основных показателей, а, наоборот, придавая им новые печатно-технические свойства. [22]

Заключение

Технологический суверенитет страны направлен на развитие собственного рынка и требует для отечественных производителей полиграфической отрасли новых технологий и технологических решений. Необходимо создание модели оптимального технико-экономического профиля использования отечественной компонентной базы, а также новые расходные материалы для полиграфической промышленности.

Совместив технологический и системный подход для решения задачи обеспечения отрас-

ли лакокрасочными продуктами для полиграфической отрасли отечественного производства ставится цель по разработке технологии получения лакокрасочных покрытий с применением ультразвуковых воздействий на растворы лакокрасочных образцов, обладающих разными реологическими характеристиками.

Список литературы

1. Ляпков А.А., Сутягин В.М., Лопатинский В.П., Бондалетов В.Г. Основы проектирования и оборудования производств полимеров: учебное пособие для вузов // Санкт-Петербург: Лань, 2025г;
2. Композитный мир: Пост-релиз конференции «Композиты и компаунды 2017» . URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/624/?top=624>.
3. Кордюкова А.П. Перспективные направления развития полимерных связующих и полимерных композиционных материалов на их основе// Молодой ученый.2022г.- №30(425). 1-4с.;
4. Котенко В.Д., Лопатников М.В., Обливин А.Н. и др. Моделирование свойств и процессов прессования реактопластов: монография // Москва. ГОУ ВПО МГУЛ. 2005г., 3с.;
5. Кочнев А.М., Галибеев С.С. Пластификация полимеров. Конспект лекций // ККТУ. Казань. 1996г;
6. Кербер М. Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Под ред.: Берлин А. А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. 2008г.;
7. Кочнев А.М., Рязанова Л.З. Ориентационные явления в полимерах. Конспект лекций // ККТУ. Казань. 1996г;
8. Негров Д.А., Плохотнюк П.В., Вебер Д.А., Плохотнюк А.В., Волков Н.А. Влияние ультразвуковых колебаний на структуру полимерного композиционного материала // Машиностроение и машиноведение. – Омский научный вестник №2. 2010;
9. Сапаев Х.Х., Мусов И.В., Хаширова С.Ю. и др. Изучение влияния различных пластификаторов на свойства поливинилхлоридного пластика // Вестник технологического университета 2015. Т18, №9. 102-104с.;
10. Кочнев А.М., Галибеев С.С. Модификация полимеров. Конспект лекций // ККТУ. Казань. 2002г;

11. «Что полиграфист должен знать о красках», пер. с англ. В. А. Наумова; науч. редактора: В. А. Наумов, Н. Г. Друзев // Москва, ПРИНТ-МЕДИА центр, 2005г.;
12. Ванчаков М.В., Артамонов И.С. Технология и оборудование для производства картонной и бумажной тары. Часть 1. Учебное пособие // Санкт-Петербург, ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. 15-16с.;
13. Симионеску К., Опреа К. Механохимия высокомолекулярных соединений; Пер. с румын. д-ра физ.-мат. наук И. Б. Берсукара и канд. хим. наук Н. И. Беличука; под ред. проф. Н. К. Барамбойма // Москва: Мир, 1970г.;
14. Казале А., Портер Р. Реакции полимеров под действием напряжений; перевод с английского А. М. Кнебельмана, С. Г. Куличихина // Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние, 1983г.;
15. Athanasios G. Athanassiadis, Zhichao Ma, Nicolas Moreno-Gomez, Kai Melde, Eunjin Choi, Rahul Goyal, and Peer Fischer. Ultrasound-Responsive Systems as Components for Smart Materials // Chemical Reviews, 2022, 122, 5165–5208;
16. Холопов Ю.В. Машиностроение: ультразвук: УЗС, БУФО, ГЕО // Санкт-Петербург: ООО Типография Береста, 2008г.;
17. Мозговой И.В. Сварка фторопласта-4: монография // Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск, 2017г.;
18. Максимов А.Л., Антонов С.В., Замрий А.В. и др. Умные контейнеры в процессах полимеризации: влияние физических факторов на протекание реакции. // Журнал “Neftegaz.RU” 2022.
URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/pererabotka/753897-umnye-konteynery-v-protsessakh-polimerizatsii-vliyanie-fizicheskikh-faktorov-na-protekanie-reaktsii/>),
19. Arunjunai R.S. Santha Kumar, Amrishkumar Padmakumar, Uddhab Kalita, Sarthik Samanta, Anshul Baral, Nikhil K. Singha, Muthupandian Ashokkumar, Greg G. Qiao. Ultrasonics in polymer science: applications and challenges // Progress in Materials Science, Volume 136, July 2023, 101113, Version of Record 2 April 2023;
20. Кобзев Д.Е. Интенсификация процесса твёрдофазного формования полимеров и композитов ультразвуковым воздействием. Диссертация. 2012г.;
21. Gowariker V.R., Viswanathan N.V., Sreedhar Jayadev. Polimers science. Перевод Лачинов М.Б. и др. // Москва. “Наука”. 1990г.;
22. Кирш И.А., Чалых Т.И. Ультразвуковая обработка расплавов смесей полимеров различной химической природы // МГУПП, РЭУ. Известия высших учебных заведений. Серия “Химия и химическая технология” / №3 2015г. 65-69с.
23. Кирш И.А., Чалых Т.И., Ананьев В.В., Заиков Г.Е. Исследование влияния ультразвука на реологические свойства полимеров различной химической природы для создания нового способа повторной переработки полимерных композиций // Вестник технологического университета 2015. Т18, №4. 182-184с.;
24. Мухитдинов М.Б. Влияния ультразвука на свойства композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 1(118). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16643> ;
25. Гаджиев А.А., Кононенко А.С, Орлов А.М. Технологические способы повышения механических характеристик композиционных полимерных материалов // журнал «Агроинженерия», 2009;
26. Кирш И.А. Установление закономерностей влияния ультразвукового поля на физико-химические свойства и структуру расплавов полимеров при их вторичной переработке. Диссертация. 2016г.;
27. Ingrid Calvez, Sorour Davoudi, Caroline R. Szczepanski, Véronique Landry. Low-gloss UV-curable coatings: Light mechanisms, formulations and processes — A review. Progress in Organic Coatings, Volume 171, October 2022, 107039;
28. Ганиев М.М. Повышение эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов ультразвуковой обработкой // Казань: КГТУ. 2007г. 56-60с.;
29. Уткин А.О. Повышение адгезионной прочности многослойных полимерных материалов // Упаковка и логистика. №12, 2010г. 78-79с.;
30. Клубович В.В., Клушин В.А., Марусич В.И., Хрущев Е.В. Ультразвуковая сварка полимеров // Белорусский национальный технический университет. Минск. 2017;
31. Осовская И.И., Литвинов М.Ю., Васильева А.П. Технология полимеров. Применение и переработка. Самовосстанавливающиеся покрытия. Учебное пособие // Санкт-Петербург. 2020 г.;
32. Кирш И.А., Тверитникова И.С., Безнаева О.В., Банникова О.А., Кондратова Т.А., Фи-

линская Ю.А., Губанова М.И., Фролова Ю.В. Исследование влияния ультразвуковой обработки полиэтиленовых композиций, содержащих бетиулин, на формирование эксплуатационных свойств упаковочных материалов // Здоровье. 2020г. 28-40с.;

33. Гаврилова А.С., Манаенков Р.В., Филатова А.Е. Исследование влияния ультразвукового воздействия на микрокристаллическую целлюлозу // Вестник тверского государственного технического университета. 2015. №1.

Информация об авторах

Перлина М.К. - аспирант кафедры промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ).

Марикуца К.С. - кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ).

Кириш И.А. - доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, директор ЦКП «Перспективные упаковочные решения и технологии рециклинга». Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ).

References

1. Lyapkov A.A., Sutyagin V.M., Lopatinsky V.P., Bondaleto V.G. Fundamentals of polymer production design and equipment: a textbook for universities // Saint Petersburg: Lan, 2025;
2. The composite world: Post-release of the Composites and Compounds 2017 conference. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/624/?top=624>.
3. Kordyukova A.P. Promising areas of development of polymer binders and polymer composite materials based on them// A young scientist. 2022.- №30(425). 1- 4с.;
4. Kotenko V.D., Lopatnikov M.V., Oblivin A.N. and others. Modeling of properties and pro-

cesses of pressing reactoplasts: monograph // Moscow. MGUL. 2005, 3s.;

5. Kochnev A.M., Galibeev S.S. Plasticization of polymers. Lecture notes // KKTU. Kazan. 1996;

6. Kerber M. L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. Edited by: Berlin A. A. Polymer composite materials: structure, properties, technology. 2008;

7. Kochnev A.M., Ryazanova L.Z. Orientation phenomena in polymers. Lecture notes // KKTU. Kazan. 1996;

8. Negrov D.A., Plokhhotnyuk P.V., Weber D.A., Plokhhotnyuk A.V., Volkov N.A. Influence of ultrasonic vibrations on the structure of polymer composite material // Mechanical engineering and machine science. – Omsk Scientific Bulletin no.2. 2010;

9. Sapaev H.H., Musov I.V., Hashirova S.Yu. and others. Study of the effect of various plasticizers on the properties of polyvinyl chloride plastic // Bulletin of the Technological University 2015. T18, No. 9. 102-104с.;

10. Kochnev A.M., Galibeev S.S. Modification of polymers. Lecture notes // KKTU. Kazan. 2002;

11. "What a polygraph examiner should know about paints", translated from English by V. A. Naumov; scientific editorial office: V. A. Naumov, N. G. Druzhev // Moscow, PRINT Media Center, 2005;

12. Vanchakov M.V., Artamonov I.S. Technology and equipment for the production of cardboard and paper containers. Part1. Textbook // Saint Petersburg, HSE SPbGUPTD, 2022.15-16 с.;

13. Simionescu K., Oprea K. Mechanochemistry of high-molecular compounds; Translated from Romanian. Doctor of Physico-mathematical Sciences I. B. Bersukera and Candidate of Chemical Sciences N. I. Belichuk; edited by prof. N. K. Baramboim // Moscow: Mir, 1970.;

14. Casale A., Porter R. Reactions of polymers under stress; translated from English by A.M. Knebelman, S. G. Kulichikhin // Leningrad: Chemistry, Leningrad Publishing House, 1983;

15. Athanasios G. Athanassiadis, Zhichao Ma, Nicolas Moreno-Gomez, Kai Melde, Eunjin Choi, Rahul Goyal, and Peer Fischer. Ultrasound-Responsive Systems as Components for Smart Materials // Chemical Reviews, 2022, 122, 5165–5208;

16. Kholopov Yu.V. Mechanical engineering: ultrasound: UZS, BUFO, GEO // St. Petersburg: OOO Tipografiya Beresta, 2008.;

17. Mozgovoy I.V. Welding of fluoroplast-4: a monograph // Ministry of Education and Science of Russia, OmSTU. Omsk, 2017;

18. Maksimov A.L., Antonov S.V., Zamri A.V. and others. Smart containers in polymerization processes: the influence of physical factors on the reaction. // Journal "Neftegaz.RU" 2022.

URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/753897-umnye-konteynery-v-protsessakh-polimerizatsii-vliyanie-fizicheskikh-faktorov-na-protekanie-reaktsii/>),

19. Arunjunai R.S. Santha Kumar, Amrishkumar Padmakumar, Uddhab Kalita, Sarthik Samanta, Anshul Baral, Nikhil K. Singha, Muthupandian Ashokkumar, Greg G. Qiao. Ultrasonics in polymer science: applications and challenges // *Progress in Materials Science*, Volume 136, July 2023, 101113, Version of Record 2 April 2023;

20. Kobzev D.E. Intensification of the process of solid-phase molding of polymers and composites by ultrasonic action. Dissertation. 2012;

21. Gowariker V.R., Viswanathan N.V., Sreedhar Jayadev. Polymers science. Translated by Lachinov M.B. and others // Moscow. "Science". 1990.;

22. Kirsh I.A., Chalykh T.I. Ultrasonic treatment of melts of polymer mixtures of various chemical nature // MGUPP, PRUE. News of higher educational institutions. Series "Chemistry and Chemical technology" / No. 3 2015. 65-69s.

23. Kirsh I.A., Chalykh T.I., Ananyev V.V., Zaikov G.E. Investigation of the effect of ultrasound on the rheological properties of polymers of various chemical nature to create a new method of recycling polymer compositions // *Bulletin of the Technological University* 2015. T18, No. 4. 182-184c.;

24. Mukhitdinov M.B. The effects of ultrasound on the properties of composite polymer materials and coatings based on them // *Universum: technical sciences : electron. scientific journal*. 2024. 1(118). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16643> ;

25. Gadzhiev A.A., Kononenko A.S., Orlov A.M. Technological methods for improving the mechanical characteristics of composite polymer materials // *Journal of Agroengineering*, 2009;

26. Kirsh I.A. Establishment of patterns of the influence of the ultrasonic field on the physico-chemical properties and structure of polymer melts during their recycling. Dissertation. 2016;

27. Ingrid Calvez, Sorour Davoudi, Caroline R. Szczepanski, Véronique Landry. Low-gloss UV-curable coatings: Light mechanisms, formulations

and processes — A review. *Progress in Organic Coatings*, Volume 171, October 2022, 107039;

28. Ganiev M.M. Improving the performance characteristics of polymer composite materials by ultrasonic treatment // *Kazan: KSTU*. 2007. 56-60 c.;

29. Utkin A.O. Improving the adhesive strength of multilayer polymer materials // *Packaging and Logistics*. No. 12, 2010 78-79 c.;

30. Klubovich V.V., Klushin V.A., Marusich V.I., Khrushchev E.V. Ultrasonic welding of polymers // *Belarusian National Technical University*. Minsk. 2017;

31. Osovskaya I.I., Litvinov M.Yu., Vasilyeva A.P. Polymer technology. Application and processing. Self-healing coatings. Study guide // *Saint Petersburg*, 2020;

32. Kirsh I.A., Tveritnikova I.S., Beznaeva O.V., Bannikova O.A., Kondratova T.A., Filinskaya Yu.A., Gubanova M.I., Frolova Yu.V. Investigation of the effect of ultrasonic treatment of polyethylene compositions containing betulin on the formation of the operational properties of packaging materials // *Health*. 2020-240 c.;

33. Gavrilova A.S., Manaenkov R.V., Filatova A.E. Investigation of the effect of ultrasound exposure on microcrystalline cellulose // *Bulletin of Tver State Technical University*. 2015. №1.

Information about the authors

Perlina M.K. - Postgraduate student of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIO TECH).

Marikutsa K.S. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIO TECH).

Kirsh I.A. - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Director of the CCG "Promising packaging solutions and recycling technologies". Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIO TECH).

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

Статья поступила в редакцию 25.10.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 25 Oct. 2025; approved after reviewing 25 Nov. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.