

Научные технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 30-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 30-37.

Обзорная статья
УДК 534-8, 621.792.3
doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-30-37

Применение ультразвука для обработки полимерных композиционных материалов

Сергей Константинович Сундуков¹, к.т.н.
Александр Андреевич Нечай², аспирант
Артём Анатольевич Рахматулаев³, студент

^{1, 2, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

² an.v.soyp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ rahmatulaevartem388@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Полимерные композиционные материалы широко используются при производстве и ремонте изделий машиностроения и имеют такие преимущества как снижение металлоёмкости и уменьшение массы деталей. Технология получения таких материалов требует обеспечения равномерности распределения наполнителя в полимерном связующем, что является сложной задачей вследствие высокой вязкости большинства полимеров, и необходимостью диспергирования агломератов частиц наполнителей, образованных в процессе хранения. Перспективным способом обработки таких систем является использование ультразвуковых колебаний, которые за счёт кавитации позволяют диспергировать частицы наполнителя и их агломераты при одновременном перемешивании акустическими потоками. В статье приведён обзор современных исследований по данной тематике с точки зрения дальнейших перспектив. Основные направления связаны с диспергированием углеродных нанотрубок, выравниванием положения наполнителей в поле стоячих волн, пропитка волокнистых наполнителей, обработка полимерных материалов для снижения вязкости и перед нанесением покрытий. Анализ рассмотренных работ подтверждает эффективность применения ультразвуковой обработки в процессах получения полимерных композиционных материалов. Тем не менее, существуют значительные проблемы, к которым относятся длительное время обработки до нескольких часов, сложная последовательность получения полимерного композиционного материала, высокие амплитуды обработки до 80 мкм, сложности разделения агломератов частиц в высоковязких жидкостях. По результатам обзора предложены основные направления дальнейших исследований, позволяющих определить влияние параметров режима ультразвуковой обработки на свойства различных составов полимерных композиционных материалов в жидком состоянии и после полимеризации, а также повысить эффективность обработки полимеров с высокой вязкостью.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, ультразвуковая обработка, вязкость, кавитация, диспергирование

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00013, <https://rscf.ru/project/25-29-00013/>

Для цитирования: Сундуков С.К., Нечай А.А., Рахматулаев А.А. Применение ультразвука для обработки полимерных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 30-37. doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-30-37

Ultrasonic application in polymer composite materials processing

Sergey K. Sundukov¹, PhD. Eng.
Alexander A. Nechai², PhD student
Artyom A. Rakhmatulaev³, student

^{1, 2, 3} Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI) Moscow, Russia

¹sergey-lefmo@yandex.ru,

²an.v.soyp@gmail.com

³rahmatulaevartem388@gmail.com

Abstract. Polymer composite materials are widely used in the manufacture and repair of machine-building products and have some advantages like reduction of both metal consumption and composite weight. The technology for producing such materials requires uniform distribution of the filler in the polymer binder, which is a difficult task due to the high viscosity of most polymers and the necessity to disperse agglomerates of filler particles formed during storage. A promising method for processing such systems is the use of ultrasonic vibrations, which, due to cavitation, make it possible to disperse filler particles and their agglomerates while mixing with acoustic currents. The article provides a review of current research on this topic with reference to further trend. The main directions are related to the dispersion of carbon nanotubes, alignment of the position of fillers in the field of standing waves, impregnation of fibrous fillers, processing of polymer materials to reduce viscosity and before coating. The operational analysis confirms the effectiveness of ultrasonic treatment in the production of polymer composite materials. Nevertheless, there are significant problems, which include a long processing time of up to several hours, a complex sequence of obtaining a polymer composite material, high processing amplitudes of up to 80 microns, and difficulties in separating particle agglomerates in highly viscous liquids. Based on the results of the review, the main directions of further research are proposed to determine the effect of the parameters of the ultrasonic treatment mode on the properties of various compositions of polymer composite materials in the liquid state and after polymerization, as well as to increase the efficiency of processing polymers with high viscosity.

Keywords: polymer composite materials, ultrasonic processing, viscosity, cavitation, dispersion

Acknowledgments: the study was supported by grant No. 25-29-00013 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-29-00013/>

For citation: Sundukov S.K., Nechai A.A., Rakhmatulaev A.A. Ultrasonic application in polymer composite materials processing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 30-37 doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-30-37

Введение

В последнее время при производстве и ремонте изделий машиностроения всё чаще применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Сочетание различных типов связующих и наполнителей позволяет добиться свойств сопоставимых с металлическими материалами или даже превышать их. Преимуществами ПКМ являются снижение металлоёмкости производства, уменьшение массы конечного изделия и его себестоимости [1].

Полимерные композиционные материалы применяются при изготовлении деталей на замену металлических, нанесении покрытий различного функционального назначения и при получении клеевых соединений [2].

Основным требованием к ПКМ является равномерность распределения наполнителя по полимерной матрице. Решение данной задачи осложняется следующими факторами: высокая вязкость большинства применяемых полимеров, что затрудняет равномерное перемешивание состава ПКМ; склонность мелкодисперсных наполнителей к образованию

агломератов частиц в процессе хранения и трудности их разделения.

Одним из способов, позволяющих одновременно производить перемешивание и диспергирование, является ультразвуковая обработка. Под действием ударных волн, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков, могут разрушаться агломераты частиц, а их распределение по объёму осуществляется за счёт акустических крупномасштабных потоков, которые возникают при амплитудах колебаний инструмента свыше 10...12 мкм [3].

Приведён обзор применения ультразвуковых технологий в процессе получения ПКМ.

Применение ультразвука в процессе получения полимерных композиционных материалов

В работе [4] представлены различные способы получения полимерных композиционных материалов для защиты от радиации. В качестве одного из эффективных методов указана ультразвуковая обработка, проводимая

путём погружения излучателя в смесь двух растворов в импульсном режиме (рис. 1). Основным эффектом является схлопывание кавитационных пузырьков.

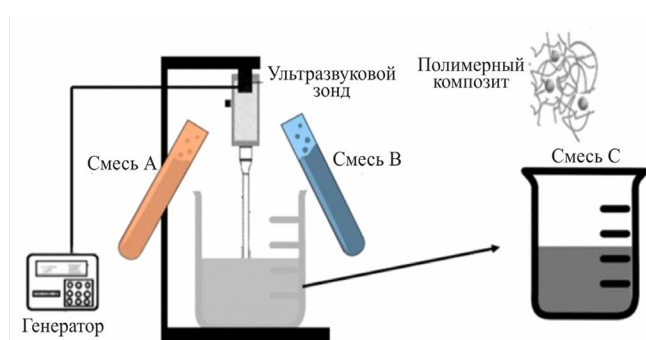


Рис. 1. Общая схема ультразвуковой обработки ПКМ

Fig. 1. General scheme of ultrasonic processing of PCM

В работе [5] проведены исследования по диспергированию частиц диоксида титана диаметром 10 нм в эпоксидную смолу с помощью ультразвуковой обработки методом погружения в смесь излучателя колебаний частотой 20 кГц и амплитудой 65 мкм в течение 15 мин. Перед обработкой смесь нагревали для снижения вязкости, а в процессе обработки охлаждали с помощью ледяной воды, чтобы температура не превысила 100 °С. Объём смеси с 10 %-ном содержанием наполнителя составлял 400 мл. Структура образца приведена на рис. 2.

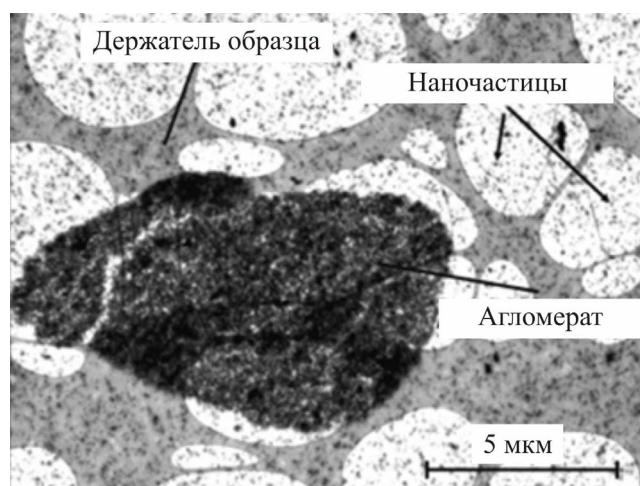


Рис. 2. Структура ПКМ с агломератом частиц диоксида титана

Fig. 2. Structure of PCM with agglomerate of titanium dioxide particles

В результате обработки размер частиц превышал номинальный, из чего сделан вывод о недостаточной мощности колебаний для диспергирования агломератов частиц. Полученный композит обладает повышенными свойствами при испытаниях на изгиб и ударную вязкость.

Исследования [6] нацелены на повышение механических свойств полимерных композитных материалах из термореактивной уретановой смолы (вязкость 80 сПз) с углеродными нанотрубками. Предварительное диспергирование и перемешивание нанотрубок, массовая доля которых составляла 1 %, производилось с помощью ультразвука. ПКМ в жидком состоянии заливался в полость, имеющую форму образца на растяжение. В процессе полимеризации в зоне узкой части образца располагались два пьезокерамических излучателя с частотой колебаний 190 кГц для образования стоячей волны посередине шейки образца (рис. 3).

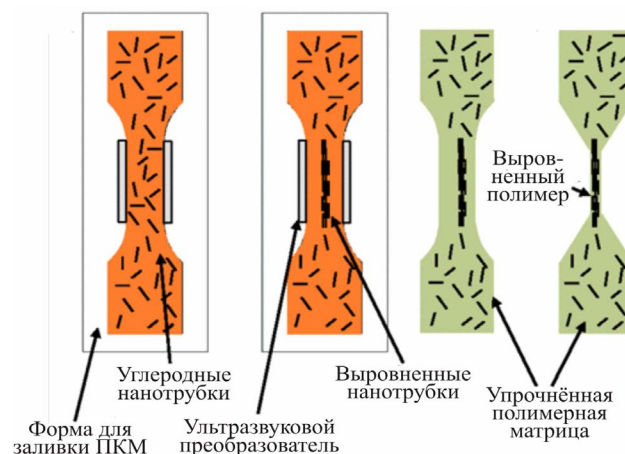


Рис. 3. Изготовление образца ПКМ для испытаний на растяжение

Fig. 3. Production of a PCM sample for tensile testing

В результате в зоне стоячей волны достигается сверхвысокая массовая доля ориентированных углеродных нанотрубок порядка 10 % по массе. Испытания показали увеличение предела прочности с 15 МПа для чистого полимера до 27 МПа для образца, полученного по предлагаемой технологии.

Такой же принцип применяется для увеличения электропроводности полимерного композита. При обработке ультразвуком на частоте 1,5 МГц в поле стоячей волны выравнивается направленность электропроводящих стеклянных микроволокон с серебряным покрытием, что приводит к повышению электропроводности (рис. 4).

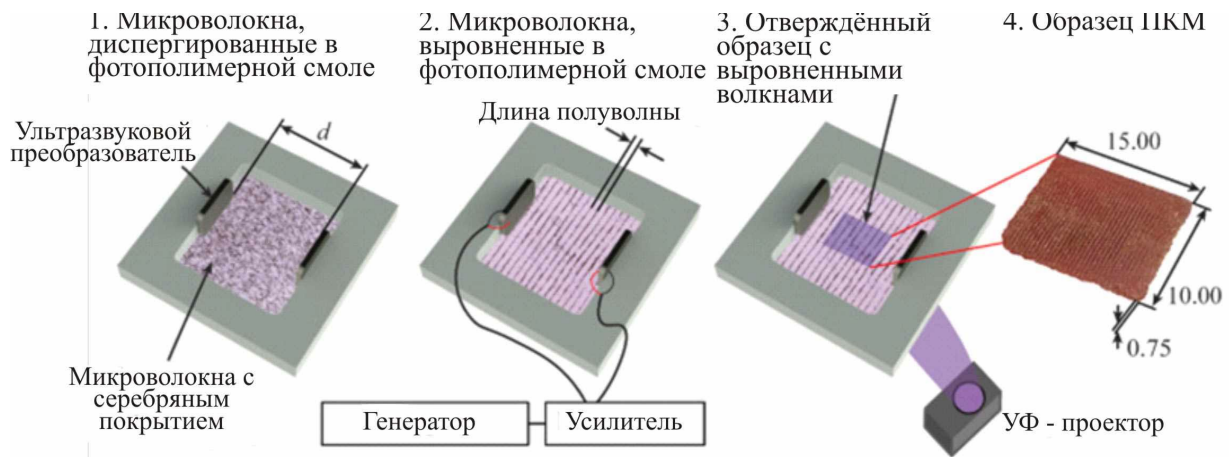


Рис. 4 Изготовление образца композитного материала с рядами выровненных стеклянных микроволокон с серебряным покрытием

Fig. 4 Production of a composite material sample with rows of aligned glass

Этим же коллективом авторов проведено исследование разработанной технологии в процессе 3D-печати. Здесь отмечены сложности с выравниванием микроволокон в зависимости от режима 3D-печати.

Авторами [7] предложена схема FDM-печати из PLA-пластиков, армированных непрерывным углеродным волокном (рис. 5). Углеродная нить пропускается через раствор смолы, который обрабатывается мощным ультразвуком (до 60 мкм), на выходе пропитанный пучок обрабатывается горячим воздухом, далее полученная нить наматывается на катушку 3D-принтера.

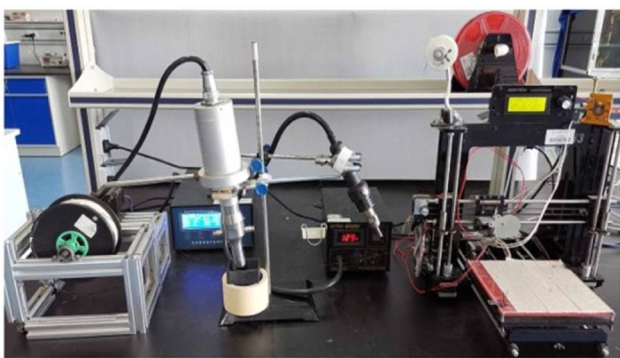


Рис. 5. Установка для FDM-печати с армированием проволоки

Fig. 5. Installation for FDM-printing with wire reinforcement

Образцы изделий, напечатанные с применением ультразвука, имеют повышенную прочность на растяжение, максимум которой

достигается при амплитуде колебаний 40 мкм и составляет 164,8 МПа, что на 16 % выше, чем без ультразвуковой обработки. Это объясняется тем, что интерфейс между углеродным волокном и матрицей улучшается в результате диспергирования, смачивания и пропитки, в результате действия ультразвуковой кавитации.

Также вопросами пропитки волокнистых наполнителей занимались авторы [8]. Отмечено, что ультразвуковая обработка способствует улучшению смачиваемости волокон наполнителя и обеспечивает лучшее проникновение связующего в межволоконное пространство. На основе исследований предложены схема пропитки и разработано оборудование.

Работа [9] посвящена способом диспергирования углеродных нанотрубок в растворах полимеров. Указано, что ультразвуковая обработка позволяет эффективно диспергировать пучки нанотрубок в низковязких жидкостях. За счёт ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков, отделяются наночастицы, расположенные на внешней части пучков и агломератов наночастиц. Среди сложностей процесса отмечены трудности при диспергировании частиц в вязких полимерах, а также возможность повреждения нанотрубок при высокой интенсивности или высокой длительности обработки.

Группа авторов [10] активно занимается применением ультразвука в процессах

обработки и получения полимерных композиционных материалов. В работах указано, эффективность применения ультразвука заключается как в диспергировании и перемешивании компонентов ПКМ, так и в повышении эксплуатационных и механических свойств полимерной матрицы.

Например, на рис. 6 представлены микрошлифы поперечного сечения затвердевшего ПКМ в виде полномасштабной оболочечной конструкции из ориентированного эпоксидного органопластика.

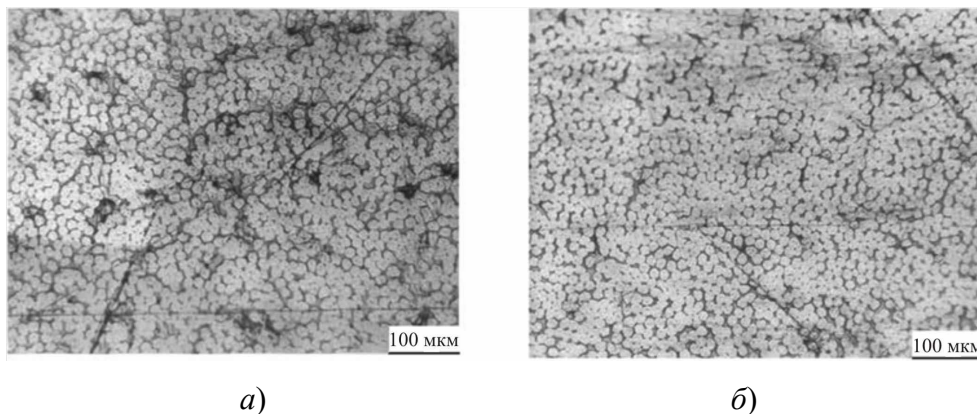


Рис. 6. Микрофотографии шлифов из ориентированного органопластика, полученного: *a* – без ультразвука; *b* – с ультразвуком

Fig. 6. Micrographs of grindings from oriented organoplasty obtained: *a* – without ultrasound; *b* – with ultrasound

В ПКМ после ультразвуковой обработки, практически отсутствуют посторонние включения (в том числе воздушные пустоты) между волокнами, а сами волокна распределены равномерно, что повышает механические свойства образцов.

Во многих работах в качестве связующего полимера используются эпоксидные смолы.

В работе [11] произведены эксперименты по получению полимерного композита на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с различными наполнителями. Обработку проводили в емкости 4×6 см, помещённую в воду, в которую устанавливался источник колебаний на частоте 20 кГц. Контейнер с полимером располагался на расстоянии 10 мм от излучателя (рис. 7).

Продолжительность процедуры составляла 5...10 мин. Минусом такой схемы обработки является то, что отсутствует в полной мере воздействие основных ультразвуковых эффектов – кавитации и акустических

течений. Тем не менее, в результате получено повышение адгезионной прочности до 1,7 раза.

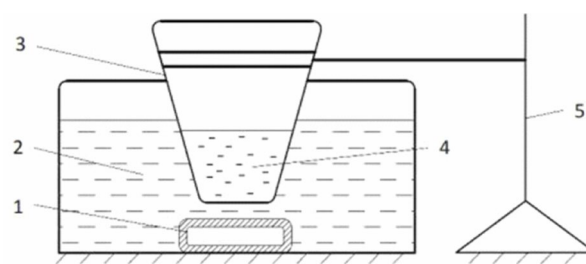


Рис. 7. Схема установки для ультразвуковой обработки ПКМ:

1 – источник колебаний; 2 – вода; 3 – ёмкость; 4 – ПКМ; 5 – держатель

Fig. 7. Scheme of the installation for ultrasonic treatment of PCM:

1 – vibration source; 2 – water; 3 – container; 4 – PCM; 5 – holder

Существуют схемы интенсификации процесса перемешивания компонентов с одновременным воздействием лопаточного колеса и ультразвуковой обработки. Состав ПКМ:

эпоксидный клей из бисфенола-А и диаминового отвердителя с наполнением наночастицами диоксида титана. Режимы ультразвуковой обработки: частота 20кГц, потребляемая мощность генератора 450 Вт, время 60 мин с циклом 5 с обработка – 15 с пауза. Наилучшие результаты по повышению прочности и пластичности показал ПКМ с добавлением 10 % TiO_2 . Это объясняется тем, что данная концентрация позволяет добиться оптимальной толщины слоя клея и его прочности. При этом влияние ультразвука на полученные результаты не описывается, т.е. он использован только в качестве оптимального способа смешивания клеевых компонентов.

Авторы [12] применяли ультразвуковую обработку для диспергирования 0,15 г диоксида титана в 20 мл диметилформамида. Для получения однородной суспензии требовалось 2 ч обработки при комнатной температуре. Далее методом центрифугирования получали плёнки толщиной 20 мкм, обладающие высокой эффективностью защиты от электромагнитных помех.

Работа [13] посвящена повышению трибологических характеристик композиционных покрытий на основе эпоксидной смолы с наполнением наночастицами гексаганального и кубического нитрида бора. Ультразвуковая обработка применялась на двух этапах получения покрытий: химическая модификация наполнителей путем обработки в соляной кислоте в течение 3 ч; получение композитной смеси путем добавления в ксилол 0,15 г порошка и обработки 30 мин, далее добавлялась 0,68 г эпоксидной смолы и обработка производилась ещё 30 мин, потом вводилось 0,17 г отвердителя и смесь обрабатывалась ещё 5 мин. На третьем этапе производилось нанесение смеси на нержавеющую сталь 304L, отверждение происходило в течение 5 дней при комнатной температуре. При испытании на сухое трение покрытие с гексаганальным нитридом бора имело коэффициент трения ниже на 8,81 % ниже, по сравнению с покрытием из чистой смолы. Морфология следов износа представлена на рис. 8.

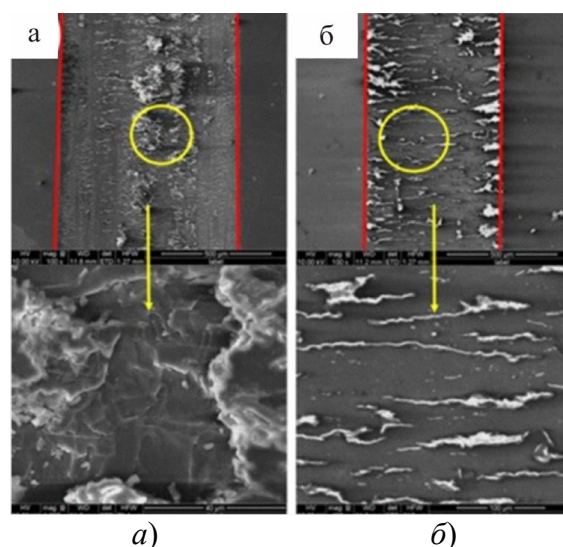


Рис. 8. Морфология следов износа образцов, полученных:

a – из чистой эпоксидной смолы; *б* – ультразвуковой обработкой смеси эпоксидной смолы и гексаганального нитрида бора

Fig. 8. Morphology of wear marks of samples obtained:
a – from pure epoxy resin; *b* – by ultrasonic treatment of a mixture of epoxy resin and hexagonal boron nitride

На рис. 8, *a* видно, что на дне следов износа существует множество углублений, это связано с отслоением матрицы эпоксидной смолы. При добавлении наполнителя (рис. 8, *б*) степень отслоения намного слабее.

Получение полимерных композиционных покрытий для ремонта деталей и узлов морских судов рассмотрено в [14]. В обработанную ультразвуком эпоксидную матрицу добавлялись наночастицы сажи технического углерода марки PowCarbon 2419G. Режимы ультразвуковой обработки в статье не приведены, но отмечено изменение вязкости и повышение температуры. Изменение концентрации наполнителя позволяет добиться требуемой вязкости для нанесения покрытия. Также произведено нанесение покрытий на реальные изделия.

Исследования по ультразвуковой обработке лакокрасочных материалов, являющихся суспензией пигментов в полимере, проведены в [15].

Ультразвуковая обработка краски сопровождается протеканием ряда процессов, одновременно ведущих к снижению вязкости: перемешивание, нагрев, деполимеризация и дезагломерация, и инициирующих реакцию полимеризации в результате испарения растворителя и ускорения химических реакций. При этом все режимы обработки характеризуются предельным значением снижения вязкости до 70 % и отличаются скоростью воздействия – с увеличением амплитуды скорость возрастает (рис. 9).

Диспергирование частиц пигмента, входящих в состав ЛКМ происходит только на низкоамплитудном и переходном режимах обработки (амплитуда до 12 мкм), обладающих высокой кавитационно-эрозионной активностью.

Существует большое количество исследований, где применяют ультразвуковую обработку с целью дезагломерации углеродных нанотрубок, что уже рассмотрено в ряде работ выше. Имеются работы с диспергированием графена с помощью ультразвука, что является довольно перспективным методом и в дальнейшем может применяться при нанесении покрытий. Ещё одним направлением является использование ультразвуковой обработки в качестве способа очистки поверхностей, повышения их поверхностной энергии и создания лучших условий для формирования полимерных покрытий.

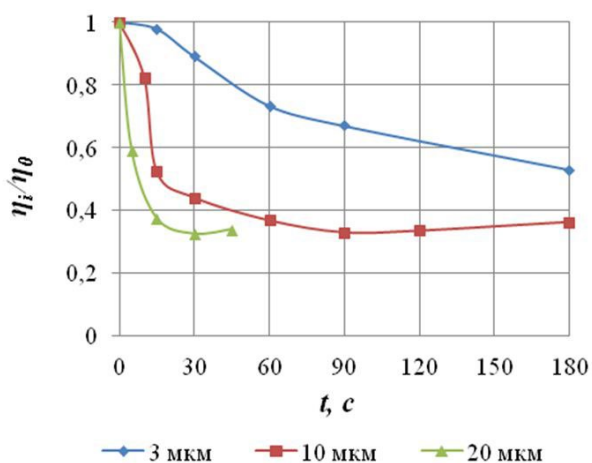


Рис. 9. Изменение вязкости ЛКМ при ультразвуковой обработке

Fig. 9. Change in the viscosity of paint coatings under ultrasonic treatment

Выводы и перспективы

Анализ рассмотренных работ показывает положительный эффект применения ультразвука при обработке ПКМ. Основными проблемами технологий являются: длительное время обработки до нескольких часов, сложности разделения агломератов частиц, ограничение возможностей применения ультразвука для высоковязких жидкостей.

Таким образом, данные технологии в настоящий момент находятся в стадии развития и накопления теоретического и экспериментального материала. Поэтому с точки зрения перспектив и расширения возможностей ультразвуковой обработки ПКМ требуется проведение дополнительных исследований по следующим направлениям:

– влияние параметров ультразвуковой обработки (частота и амплитуда колебаний, время) на свойства широкой номенклатуры связующих/матриц (вязкость, размеры полимерной матрицы, кавитационная прочность, угол смачивания);

– влияние различных наполнителей и их концентрации на свойства получаемого полимерного композиционного материала и параметры процесса его получения в зависимости от режима ультразвукового воздействия;

– исследование кинетики полимеризации полимерных составов после ультразвуковой обработки;

– разработка методов и оборудования для повышения эффективности передачи ультразвуковых колебаний для высоковязких полимеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенко Е.А. Перспективы применения нейросетевого моделирования при оценке структуры и свойств полимерных композиционных материалов с гибридными матрицами // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 2. С. 15–20. DOI:10.31044/1994-6260-2022-0-2-15-20

2. Коноплин А.Ю., Баурова Н.И. Оценка прочностных свойств клеесварных соединений при отрицательных температурах // Технология металлов. 2020. № 8. С. 13–17. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-8-13-17

3. Сундуков С.К. Возможности ультразвуковой обработки при получении полимерных композиционных материалов // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы (ТА2025): Сборник материалов V Международной научной конференции, Тольятти, 19–21 мая 2025 года. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2025. С. 40–41.

4. More C.V., Alsayed, Z., Badawi M.S., Thabet A.A., Pawar P.P. (2021). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. Environmental chemistry letters. Pp. 2057–2090. DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9

5. Bittmann B., Hauptert F., Schlarb A.K. Preparation epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship. Ultrasonics Sonochemistry, № 18 (1). Pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.03.011

6. Greenhall J., Homel L., Raeymaekers B. Ultrasound directed self-assembly processing of nanocomposite materials with ultra-high carbon nanotube weight fraction. Journal of Composite Materials. № 53 (10). Pp. 1329–1336. DOI: 10.1177/0021998318801452

7. Qiao J., Li Y., Li L. Ultrasound-assisted 3D-printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites. Additive Manufacturing. Pp. 100926. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100926

8. Хмельв В.Н. Ультразвуковая пропитка полимерных композиционных материалов // Южно-сибирский научный вестник. 2012. № 2. С. 193–196.

9. Lu K.L., Lago R.M., Chen Y.K., Green M.L.H., Harris P.J.F., Tsang S.C. Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound, Carbon. 1996, Pp. 814–816, ISSN 0008-6223

10. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 4. С. 74–85.

11. Vitalii K., Petro S., Viktoria M., Yuliia H., Serhii S. Examining the effect of physical fields on the adhesive strength of protective epoxy composite coatings. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Pp. 16–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.103128

12. Wang Y., Peng H.K., Li T.T., Shiu B.C., Ren H.T., Zhang X., Lin J.H. MXene-coated conductive composite film with ultrathin, flexible, self-cleaning for high-performance electromagnetic interference shielding. Pp. 128681. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128681

13. Zhao W., Zhao W., Huang Z., Liu G., Wu B. Tribological performances of epoxy resin composite coatings using hexagonal boron nitride and cubic boron nitride nanoparticles as additives. Chemical Physics Letters, 732, 136646. DOI:10.1016/j.cplett.2019.136646

14. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. № 35 (6), Pp. 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286

15. Приходько В.М., Нигметзянов С.К., Сундуков С.К. Применение гибридных ультразвуковых технологий для получения функциональных покрытий. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Техполиграфцентр». 2023. 199 с. ISBN 978-5-94385-212-1.

REFERENCES

1. Kosenko E.A. Prospects for applying the neural network modeling for estimating the structure and properties of polymer composite materials with hybrid matrices // All materials. Encyclopedia reference. 2022. No. 2. pp. 15–20. DOI:10.31044/1994-6260-2022-0-2-15-20

2. Konoplin A.Yu., Baurova N.I. Evaluation of strength properties of adhesive-welded joints under negative temperatures // Technology of metals. 2020. No. 8. pp. 13–17. DOI: 10.31044/1684-2499-2020-0-8-13-17

3. Sundukov S.K. Possibilities of ultrasonic processing in the production of polymer composite materials // Technical acoustics: developments, problems, prospects (TA2025): Proceedings of the V-th International Scientific Conference, Tolyatti, May 19-21, 2025. Tolyatti: Tolyatti State University, 2025. pp. 40–41.

4. More C.V., Alsayed, Z., Badawi M.S., Thabet A.A., Pawar P.P. (2021). Polymeric composite materials for

radiation shielding: a review. Environmental chemistry letters. Pp. 2057–2090. DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9

5. Bittmann B., Hauptert F., Schlarb A.K. Preparation epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship. Ultrasonics Sonochemistry, № 18 (1). Pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.03.011

6. Greenhall J., Homel L., Raeymaekers B. Ultrasound directed self-assembly processing of nanocomposite materials with ultra-high carbon nanotube weight fraction. Journal of Composite Materials. № 53 (10). Pp. 1329–1336. DOI: 10.1177/0021998318801452

7. Qiao J., Li Y., Li L. Ultrasound-assisted 3D-printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites. Additive Manufacturing. Pp. 100926. DOI:10.1016/j.addma.2019.100926

8. Khmelev V.N. Ultrasonic impregnation of polymer composite materials // South Siberian Scientific Bulletin. 2012. No. 2. pp. 193–196.

9. Lu K.L., Lago R.M., Chen Y.K., Green M.L.H., Harris P.J.F., Tsang S.C. Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound, Carbon. 1996, Pp. 814–816, ISSN 0008-6223

10. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials on an organic basis // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2021. No. 4. pp. 74–85.

11. Vitalii K., Petro S., Viktoria M., Yuliia H., Serhii S. Examining the effect of physical fields on the adhesive strength of protective epoxy composite coatings. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Pp. 16–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.103128

12. Wang Y., Peng H.K., Li T.T., Shiu B.C., Ren H.T., Zhang X., Lin J.H. MXene-coated conductive composite film with ultrathin, flexible, self-cleaning for high-performance electromagnetic interference shielding. pp. 128681. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128681

13. Zhao W., Zhao W., Huang Z., Liu G., Wu B. Tribological performances of epoxy resin composite coatings using hexagonal boron nitride and cubic boron nitride nanoparticles as additives. Chemical Physics Letters, 732, 136646. DOI: 10.1016/j.cplett.2019.136646

14. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. № 35 (6), Pp. 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286

15. Prihodko V.M., Nigmatzyanov S.K., Sundukov S.K. Application of hybrid ultrasound technologies for obtaining functional coatings. Moscow: Limited Liability Company «Technopoligrafstentr». 2023. 199 p. ISBN 978-5-94385-212-1.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 23.02.2026.

The article was submitted 19.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 23.02.2026.