

УДК 534-8 + 621.9.048.6

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. К. СУНДУКОВ, А. А. НЕЧАЙ, А. А. РАХМАТУЛАЕВ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический  
университет (МАДИ)  
Москва, Россия

Основным требованием при производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ) является равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице. Сложность данного процесса заключается в высокой вязкости большинства применяемых полимерных материалов, что затрудняет перемешивание компонентов, и в склонности мелкодисперсного наполнителя образовывать большие по размеру трудноразделяемые агломераты [1].

Для этих целей перспективно использование ультразвуковой обработки. Ударные волны и кумулятивные струи, возникающие при схлопывании кавитационных пузырьков [2, 3], способствуют диспергированию агломератов частиц, а крупномасштабные акустические потоки при высокоамплитудных режимах обработки [4, 5] осуществляют перемешивание и распределение компонентов по объёму.

В данной работе приведены результаты исследований по влиянию режимов ультразвуковой обработки на свойства и структуру ПКМ на основе эпоксиодно-диановой смолы ЭД-20 (ЭДП) с добавлением 1 % гексаганального нитрида бора (НБ) по массе. Выбор наполнителя обусловлен высокой склонностью к образованию агломератов, плохой смачиваемостью большинством полимеров и высокими показателями по износостойкости и прочности.

Обработка осуществлялась путём погружения в 40 г жидкого ПКМ излучателя стержневой колебательной системы. При этом компоненты ПКМ были предварительно размешаны и нагреты до 25 °С. Амплитуда колебаний  $\xi_m$  составляла 20 мкм, что обеспечивает наибольшую кавитационно-эрозионную активность для значений вязкости 800...1300 мПа·с, которые были получены при проведении предварительных экспериментов.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что в процессе ультразвуковой обработки частицы наполнителя и их агломераты являются зародышами кавитационных пузырьков, которые активно образуются, пульсируют и схлопываются рядом с ними. Возникающие при этом высокие давления и температуры приводят к диспергированию крупных агломератов наполнителя (рис. 1), разрушению макромолекул полимера и дефрагментации полимерных цепочек, а также вызывают значительное повышение температуры вследствие поглощения полимером акустической энергии.

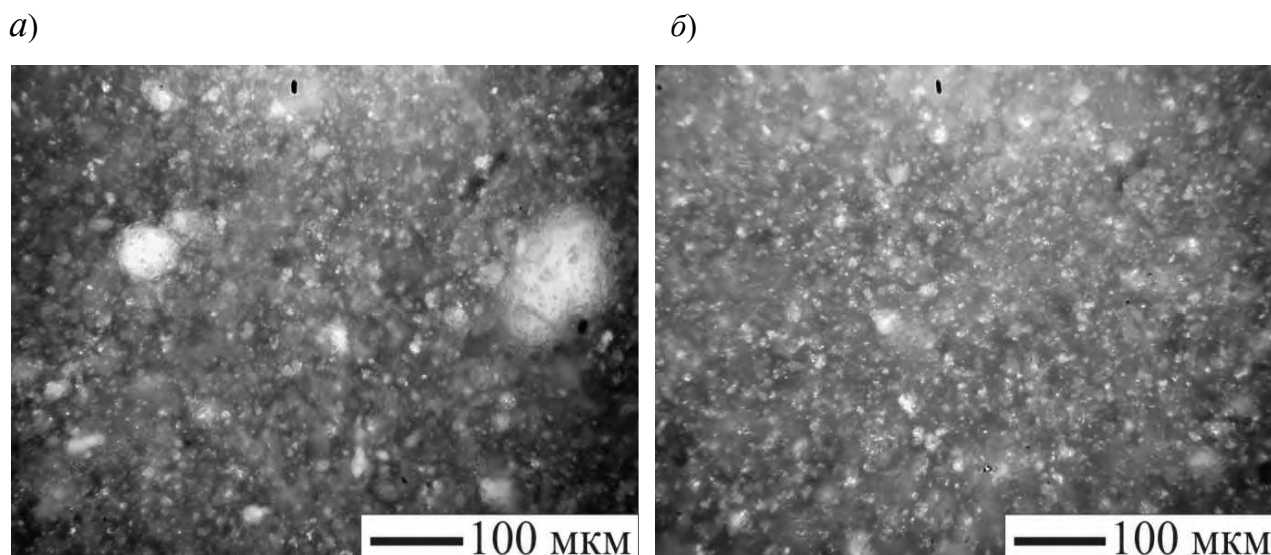


Рис. 1. Структура ПКМ: *a* – без обработки; *б* –  $\xi_m = 20$  мкм,  $t = 15$  с

Воздействие данных факторов приводит к значительному снижению вязкости до 15 %...25 % от начальной, измельчению структуры ПКМ и повышению равномерности распределения наполнителя в полимерной матрице. Это также приводит к повышению смачивающей способности ПКМ.

Полученные изменения свойств ПКМ, очевидно, оказывают влияние на его механические характеристики.

Испытания на растяжение показали повышение прочности на сдвиг на 20 %...25 %.

В результате трибологических испытаний установлено повышение износостойкости в 5–6 раз.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00013 (<https://rscf.ru/project/25-29-00013>).*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bittmann, B.** Preparation of TiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship / B. Bittmann, F. Hauptert, A. K. Schlarb // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2011. – № 18 (1). – P. 120–126.
2. Comparison of the effects of ultrasonic cavitation on the surfaces of 45 and 40Kh steels / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, V. M. Prikhodko [et al.] // *Metals*. – 2022. – Vol. 12 (1). – P. 138.
3. **Mayson, T. J.** Ultrasonic cleaning: An historical perspective / T. J. Mayson // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016. – Vol. 29. – P. 519–523.
4. The role of surfactant headgroup, chain length, and cavitation microstreaming on the growth of bubbles by rectified diffusion / T. Leong, J. Collis, R. Manasseh [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2011. – Vol. 115 (49). – P. 24310–24316.
5. Comparison of Ultrasonic Surface Treatment Methods Applied to Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloy / S. K. Sundukov [et al.] // *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. – 2025. – Vol. 27 (2). – P. 6–28.