

Теплопроводность наножидкостей, модифицированных гибридным наноматериалом состава детонационные алмазные наночастицы-углеродные нанотрубки

© Е.Д. Эйдельман,¹ А.А. Возняковский,¹ А.П. Возняковский,² С.В. Кидалов,¹ Е.И. Калашникова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. акад. С.В. Лебедева,
198035 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: eidelman@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2024 г.

В окончательной редакции 4 октября 2024 г.

Принято к публикации 4 октября 2024 г.

Исследованы наножидкости на основе гибридного углеродного наноматериала, состоящего из отдельных образований, центральная часть которых — алмазная наночастица, а периферийная часть — углеродные нанотрубки. Показано, что фактором, определяющим коэффициент теплопроводности наножидкости, является объемная доля, которую составляют наночастицы. Это доказано для сферически-симметричных наночастиц. Оценки показывают, что такое свойство будет в той или иной степени проявляться и для наночастиц другой формы.

Ключевые слова: наножидкость, наноалмаз, углеродная нанотрубка.

DOI: 10.61011/JTF.2025.02.59721.298-24

Введение

Системы эффективного теплоотвода являются обязательным элементом большинства технологических процессов обработки материалов. Точение, фрезерование, сверление, шлифование, резание сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, неметаллических конструкционных материалов, штамповка и прокатка металлов характеризуются большими статическими и динамическими нагрузками, высокими температурами, воздействием обрабатываемого материала на режущий инструмент, штамповочное и прокатное оборудование. В этих условиях основное назначение систем эффективного теплоотвода — уменьшить температуру, силовые параметры обработки и износ режущего инструмента, штампов и валков. Помимо этого, системы теплоотвода должны отвечать гигиеническим, экологическим и другим требованиям, обладать комплексом антикоррозионных, моющих, антимикробных и других эксплуатационных свойств. Применение систем теплоотвода при обработке металлов резанием и давлением позволяет увеличить производительность оборудования, уменьшить брак, улучшить условия труда и в ряде случаев сократить число технологических операций. Для решения данной задачи исследователи часто используют так называемые наножидкости — устойчивые суспензии материалов с высокой теплопроводностью, в частности, на основе детонационных наноалмазов [1] и углеродных нанотрубок [2]. Причиной популярности данных материалов являются их рекордные значения теплопроводности. Так, теплопроводность детонационных наноалма-

зов оценивается в $2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [3], а теплопроводность углеродных нанотрубок может достигать значений до $3000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [4].

Модификация систем теплоотвода на основе наножидкостей с углеродными гибридными наноматериалами состава алмазные наночастицы детонационного синтеза — углеродные нанотрубки (ДНА — УНТ), как это было показано нами ранее [5,6], дает возможность получить уникальные системы теплоотвода, имеющие повышенную теплопроводность охлаждающей жидкости. Это позволит увеличить срок службы обрабатываемого инструмента и скорость обработки деталей, и при этом не будет практически ухудшать свойства систем теплоотвода и качества обрабатываемых материалов по другим параметрам.

Получение охлаждающих наножидкостей на основе таких углеродных гибридных наноматериалов представляется несложным, воспроизводимым и масштабируемым.

1. Теплопроводность наножидкости с гибридным материалом ДНА — УНТ

Важнейшим свойством наножидкости, которая создается добавлением порошка ДНА — УНТ в жидкость (вода, этиленгликоль, трансформаторные масла) является то, что коэффициент теплопроводности этих жидкостей k_l гораздо меньше коэффициента теплопроводности гибридного материала ДНА — УНТ k_p .

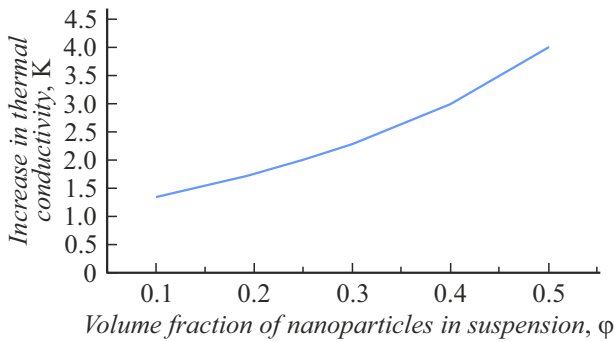


Рис. 1. Увеличение коэффициента теплопроводности наножидкости по сравнению с коэффициентом теплопроводности жидкости без наночастиц (K раз) в зависимости от объемной доли φ , занимаемой частицами гибридного материала в наножидкости.

Используемые в экспериментальных исследованиях [5,6] концентрации материала ДНА–УНТ столь малы, что частицы между собой не взаимодействуют, и каждая частица влияет на теплопроводность лишь той части жидкости, которая ее окружает.

В такой постановке коэффициент теплопроводности наножидкости в целом k_{eff} , определяется известной формулой Максвелла (см., например, [7,8]):

$$k_{\text{eff}} = k_l \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\varphi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\varphi}. \quad (1)$$

В это соотношение кроме коэффициентов теплопроводности вошла объемная доля φ , занимаемая частицами гибридного материала в наножидкости. Используя тот факт, что в рассматриваемых наножидкостях $k_p \gg k_l$, найдем, что рост коэффициента теплопроводности наножидкости по сравнению с коэффициентом теплопроводности жидкости без наночастиц $K = k_{\text{eff}}/k_l$ будет определяться исключительно объемной долей φ . Имеем

$$K = \frac{1 + 2\varphi}{1 - \varphi} \quad (2)$$

или

$$\varphi = 1 - \frac{3}{2 + K}. \quad (3)$$

Графики, позволяющие определить, какую объемную долю частиц, например ДНА–УНТ, нужно добавить в жидкость с малым коэффициентом теплопроводности (воду!), чтобы теплопроводность получившейся наножидкости была выше в K раз, приведены на рис. 1.

Высокая теплопроводность наножидкости с гибридным материалом ДНА–УНТ и возможность управления ее величиной обусловлены строением и формой, принимаемой в жидкости частицей гибридного материала ДНА–УНТ.

2. Строение и форма в жидкости гибридного материала ДНА–УНТ

На рис. 2 представлен снимок, сделанный с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) материала [6], на основе которого была создана наножидкость для предлагаемых систем теплоотвода.

На рис. 3 представлена схема такого материала. До размера примерно 400 nm частицу будем считать сферически симметричной.

Материал, характеристики которого описаны в [6,9], представляет собой многостенные (3 и более) УНТ, имеющие поперечный размер порядка 20 nm, длину не менее 150 nm каждая, коэффициент теплопроводности порядка 1000 W/(m · K), а ДНА-агрегаты имеют размер порядка 50–100 nm и состоят из агломератов алмазных наночастиц размером около 20 nm, образованных кристаллическими алмазными наночастицами

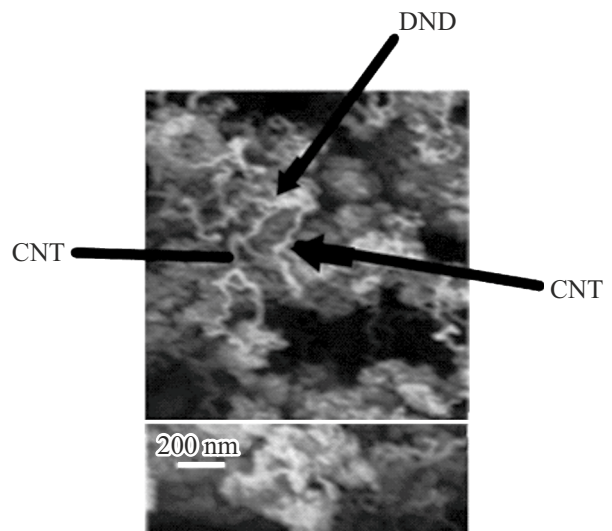


Рис. 2. СЭМ гибридного материала ДНА–УНТ. Видны УНТ (CNT), выращенные на поверхности ДНА (DND). Шкала 200 nm.

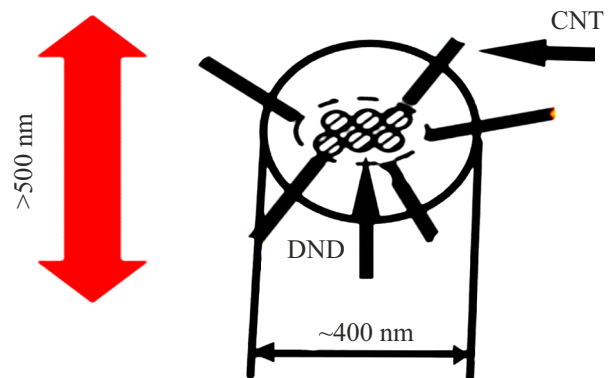


Рис. 3. Схема частицы гибридного материала ДНА–УНТ. Видны УНТ (CNT), выращенные на поверхности ДНА (DND), представляющего собой агломерат алмазных наночастиц [6].

размером около 4–5 nm. Коэффициент теплопроводности ДНА — не менее $1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Число УНТ, которые присоединяются к каждой ДНА, неизвестно. Возможная плотность нанесения УНТ, выращенных на плоской поверхности, исследовалась в [10]. Обычно УНТ распределяются приблизительно равномерно и занимают около 10% площади поверхности. Переноса этот результат на гибридный материал ДНА–УНТ, будем представлять себе отдельную ДНА–УНТ частицу как объект с почти сферической симметрией, в центре которого находится ДНА, окруженная прямолинейными УНТ, расположение которых, в свою очередь, не сильно нарушает симметрию. Коэффициент теплопроводности материала отдельной ДНА–УНТ k_p примем не менее $1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

3. Возможность создания систем эффективного теплоотвода

Зависимость, представленная на рис. 1, носит общий характер.

На рис. 4 приведено сравнение результатов измерений, приведенных в [5], с результатами вычислений по формуле (3). Соответствие результатов измерений и вычислений очевидно!

Получилось, что при существенном превышении коэффициента теплопроводности материала наночастиц над коэффициентом теплопроводности жидкости, на основе которой создается наножидкость, сама величина коэффициента теплопроводности материала добавки не важна. Фактором, определяющим коэффициент теплопроводности наножидкости, является объемная доля, которую составляют наночастицы. В настоящей работе это доказано для сферически-симметричных наночастиц, но представляется, что такое свойство будет в той или иной степени проявляться и для наночастиц другой формы.

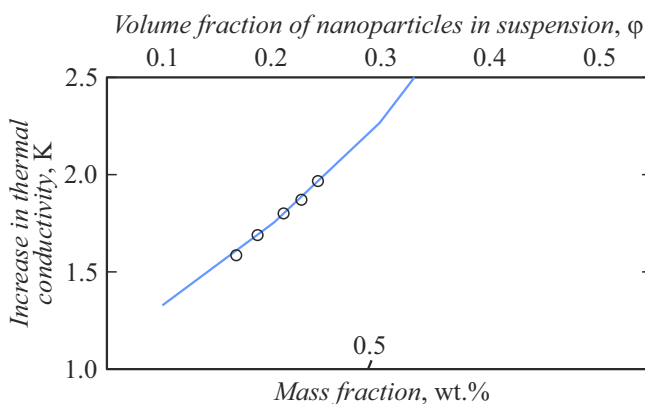


Рис. 4. Часть зависимости, представленной на рис. 3. В эксперименте в воду вводился гибридный материал ДНА–УНТ с массовой долей m при температуре 50°C . Экспериментальные результаты представлены белыми точками. Сплошная линия — результаты вычисления по формуле (3).

Необходимо отметить, что результаты измерения размера частиц методом динамического светового рассеяния (DLS) дали результат, равный примерно 50 nm [6]. Это говорит о том, что, видимо, нельзя считать правильными размеры частиц, получаемые методом DLS, и применимыми для исследования тепловых свойств подобных пористых частиц. Оказалось, что частица ДНА–УНТ имеет в 10 раз больший эффективный размер для тепловых явлений по сравнению с эффективным размером, на котором проявляется взаимодействие света в методе DLS с такой частицей.

В этом смысле гибридный материал ДНА–УНТ является уникальным. В сферическом слое, в котором располагаются УНТ, коэффициент теплопроводности будет меньше, чем коэффициент теплопроводности самих УНТ, но он, несомненно, останется гораздо больше коэффициента теплопроводности жидкости, на основе которой создается теплопроводящая наножидкость. Сами „тяжелые“ УНТ занимают при этом лишь малую часть объема слоя, что существенно снижает плотность слоя и приводит к тому, что совсем небольшим массовым долям гибридных наночастиц соответствуют весьма существенные объемные доли. Авторам неизвестны другие материалы с таким свойством.

Выводы

Рассмотренные свойства гибридного материала ДНА–УНТ приводят к возможности создания на основе соответствующей наножидкости уникальных систем эффективного теплоотвода с высоким коэффициентом теплопроводности при малых добавках наночастиц, которые, как правило, ухудшают вязкостные, гигиенические, экологические, коррозионные и другие эксплуатационные свойства.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-29-00252.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Mashali, F. Alkhalidi, G. Mirshekari. *Heat Transfer*, **35** (6), 780 (2022). DOI: 10.1080/08916152.2021.1947418
- [2] M. Moghaddari, F. Yousefi, S. Aparicio, S.M. Hosseini. *J. Mol. Liq.*, **307**, 112977 (2020). DOI: 10.1016/j.molliq.2020.112977
- [3] L.S. Sundar, M.J. Hortiguera, M.K. Singh, A.C. Sousa. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **76**, 245 (2016). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.025
- [4] E. Pop, D. Mann, Q. Wang, K. Goodson, H. Dai. *Nano Lett.*, **6**, 96 (2006). DOI: 10.1021/nl052145f

- [5] A.A. Vozniakovskii, A.P. Voznyakovskii, S.V. Kidalov, E.K. Kalashnikova. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., **1118** (1), 012024 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/1118/1/012024
- [6] A.A. Vozniakovskii, T.S. Kol'tsova, A.P. Voznyakovskii, A.L. Kumskov, S.V. Kidalov. J. Colloid Interface Sci., **565**, 305 (2020). DOI: 10.1016/j.jcis.2020.01.034
- [7] Г. Карслоу, Д. Егер. *Теплопроводность твердых тел* (Наука, М., 1964), с. 488.
- [8] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Гидродинамика* (Наука, М., 2003), с. 50.
- [9] A.E. Aleksenskiy, E.D. Eydelman, A.Ya. Vul'. Nanoscience Nanotechnology Lett., **3** (1), 68 (2011). DOI: 10.1166/nnl.2011.1122
- [10] A.Ya. Vul', K.V. Reich, E.D. Eidelman, M.L. Terranova, A. Ciorba, S. Orlanducci, V. Sessa, M. Rossi. Adv. Sci. Lett., **3** (2), 110 (2010). DOI: 10.1166/asl.2010.1104