

В работе определены температурные зависимости коэффициента термического линейного расширения АБС- и АБС/ПММА-пластиков трех производителей после ускоренных лабораторных климатических испытаний, эквивалентных 10 годам эксплуатации. Выполнено сопоставление полученных характеристик с аналогичными показателями до климатических испытаний. Дана оценка стабильности КТЛР изучаемых пластиков при воздействии температуры, влаги и ультрафиолета. Практическая значимость результатов состоит в оптимальном выборе конструкционных пластиков для деталей кузова транспортных и сельскохозяйственных машин по критерию стабильности свойств в условиях климатического воздействия.

Список литературы

- 1 Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Лабиринт, 1994. – 367 с.
- 2 Шах, В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения / В. Шах ; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. – СПб. : Научные основы и технологии, 2009. – 732 с.

УДК 669.018.472:678.5

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МЕТАЛЛ-АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ КАК ФАКТОРА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

С. В. ШИЛЬКО

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель*

А. И. СТОЛЯРОВ

Гомельский государственный университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

В последние годы важным фактором безопасности во многих сферах жизнедеятельности стала надежность силовой электроники, средств мобильной радиосвязи, микропроцессоров и т. д., что обусловлено широким распространением и миниатюризацией электронных приборов, повышением их удельной мощности и, соответственно, тепловыделения. Применение материалов с повышенной теплопроводностью часто остается единственным способом эффективного охлаждения перечисленных устройств. Теплопроводность обычно используемых металлов (меди, алюминия и их сплавов) уже недостаточна; к тому же они имеют довольно высокий коэффициент теплового расширения. Инновационным решением считается создание металл-алмазных композитов (МАК) благодаря их высокой теплопроводности и возможности регулирования КТР. Сочетание свойств металлической матрицы (хорошая теплопроводность, пластичность) и мелкодисперсного наполнителя в виде алмаза (максимальная теплопроводность и твердость, химическая стабильность) в принципе позволяет достичь желаемого результата. Однако из-за несовершенного контакта частиц наполнителя и металлической матрицы, обусловленного низкой смачиваемостью поверхности алмаза медью и алюминием, фактическая теплопроводность и термочность МАК может оказаться ниже, чем у матричного металла. Это преодолевается плакированием алмазов карбидами металлов при условии оптимального выбора объемного содержания частиц, толщины межфазного слоя и т. д. Однако необходимая для оптимизации диагностика температур, напряжений и локальных термомеханических повреждений МАК затрудняется микроскопическими размерами частиц наполнителя и наноразмерностью межфазного слоя.

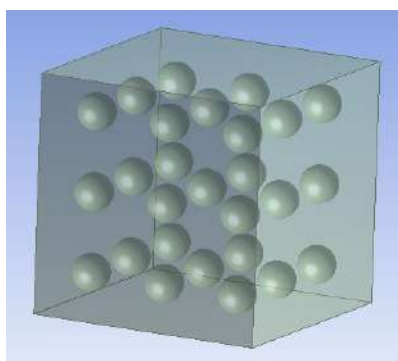
Обзор проведенных исследований показывает, что численное моделирование позволяет дать полезные рекомендации в части дизайна структуры МАК, направленного на повышение теплопроводности и термочности. Так, авторы статьи [1], изучавшие влияние формы частиц алмаза на теплопроводность МАК экспериментально и методом конечных элементов, сделали вывод, что при прочих равных условиях большее количество граней может способствовать повышению теплопроводности.

Цель работы – расчет коэффициента теплопроводности металл-алмазных композитов и распределения температуры в представительном объеме МАК исходя из теплофизических характеристик всех компонентов с представлением частиц наполнителя в виде многогранников.

Для численного моделирования процесса теплопередачи в композите «алмаз – алюминий» использовался конечноэлементный программный продукт ANSYS версии 19.0. Параметрический анализ заключался в определении величины теплового потока, коэффициента теплопроводности и распределения температуры с учетом термосопротивления границы раздела для различной толщины модифицирующего покрытия из карбида вольфрама.

На рисунке 1, *а* показана трехмерная модель представительного объема МАК регулярной структуры, содержащего матрицу в виде куба с длиной ребра 0,422 мкм и 27 сферических включений диаметром 200 нм (три ряда по девять частиц в каждом ряду) с модифицирующим покрытием, толщина которого варьировалась от 0 до 1 мкм. На двух противоположных гранях куба задавались значения температуры, остальные грани считались теплоизолированными. Коэффициенты теплопроводности материала матрицы, наполнителя и межфазного слоя задавались равными 1800, 237 и 178 Вт/(м·К) соответственно.

а)



б)

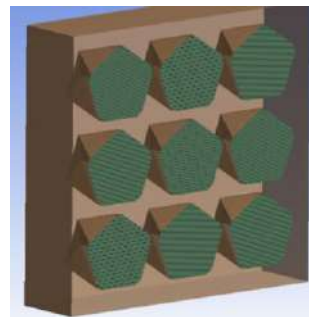


Рисунок 1 – Модельная структура МАК с частицами алмаза в виде сфер (*а*) и многогранников (*б*)

В таблице 1 сопоставлены расчеты методом конечных элементов и по зависимостям, полученным в рамках модели Такаянаги, гипотез составного включения и эквивалентной матрицы [2].

Таблица 1 – Сопоставление расчетов различными методами

| | | | | |
|--|----------------|--------|--------|--------|
| Толщина слоя, нм | 100 | 250 | 500 | 1000 |
| Тепловой поток, МВт/м ² | Нет сходимости | 12,40 | 12,46 | 12,82 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | – | 313,94 | 315,53 | 324,70 |
| Аналитическое решение | 313,82 | 313,44 | 312,82 | 311,57 |

Можно отметить достаточно хорошее совпадение аналитических и конечно-элементных оценок, однако для очень тонких покрытий (толщиной 0,1 мкм и менее) решение методом конечных элементов получить не удалось, а с увеличением толщины покрытия расхождение увеличивается.

При достаточных вычислительных ресурсах конечно-элементная дискретизация позволяет получить детальное трехмерное описание теплопередачи и термонапряженного состояния представительного объема МАК, содержащего группу частиц наполнителя (алмаза) в виде многогранников произвольной формы. В этом случае возможно использование микротомограмм металл-алмазных композитов в качестве исходных данных для конечно-элементного расчета. На рисунке 1, *б* показан представительный объем МАК в виде куба размером 1×1×1 мм, содержащего 27 включений в виде правильных многогранников (икосаэдров) размером 250–260 мкм, которые имеют 20 треугольных граней каждый. В предположении идеального контакта «алюминий – алмаз» расчетная теплопроводность композита составила 555,42 Вт/(м·К).

Построена трехмерная конечно-элементная модель процесса теплопередачи в представительном объеме металл-алмазного композита при наличии модифицирующего покрытия на частицах алмаза. На примере композита «алмаз/алюминий» с покрытием из вольфрама определены значения

теплого потока и коэффициента теплопроводности композита с включениями в виде сфер и многогранников с учетом термосопротивления границы раздела для различной толщины покрытия из вольфрама. Сделано сопоставление указанных параметров с расчетом по формулам, полученным в рамках микромеханической модели Такаянаги, гипотезы составного включения и эквивалентной матрицы, показавшее достаточно хорошее совпадение аналитических и конечноэлементных оценок.

Исследование поддержано БРФФИ (T22KI-032 «Эволюция микроструктуры и стабильность термических свойств композитов алмаз/алюминий при термоциклировании»).

Список литературы

1 Finite Element Analysis of the Effect of Particle Shape on the Thermal Conductivity in Diamond/Cu Composites / H. Guo [et al.] // Materials Science Forum. – 2014. – Vol. 788. – P. 689–692. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.788.689.

2 Шилько, С. В. Математическое моделирование процесса теплопередачи и термонапряженного состояния в металл-алмазных композитах / С. В. Шилько, Д. А. Черноус // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете : тез. докл. XVI Всерос. школы (Дивноморское, 26 – 31 мая 2022 г.). – Ростов-н/Д ; Таганрог : ЮФУ, 2022. – С. 102.

УДК 51+004

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ В WOLFRAM MATHEMATICA

О. В. ЮХНОВСКАЯ, М. А. ГУНДИНА

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Проблема сохранности данных не утрачивает своей актуальности. Методы криптографической защиты находят свое применение в системах управления на транспорте. Суть шифрования заключается в следующем. Вначале происходит переход данных через серию математических операций, которые генерируют альтернативную форму этих данных, затем получатель преобразует эту форму в исходную.

Безопасность шифрования заключается в способности алгоритма генерировать зашифрованный текст, который нелегко преобразовать в исходный. Криптографическая функция в основном зависит от значения ключа, необходимого как для шифрования, так и для дешифрования.

Двумя широко используемыми методами шифрования являются шифрование с симметричным ключом и шифрование с открытым ключом. При шифровании с симметричным ключом и отправитель, и получатель используют один и тот же ключ, необходимый для шифрования данных [1]. На сегодняшний день разработаны различные алгоритмы для описания криптографии с симметричным ключом, такие как AES, DES, 3DES, Blowfish и др. Недостатком таких методов является низкий уровень безопасности, поскольку отправитель и получатель используют один и тот же ключ (закрытый) через незащищенные каналы [2]. Это может привести к легкому обнаружению ключей шифрования и дешифрования.

Криптография с асимметричным ключом известна как криптография с открытым ключом. В шифровании с открытым ключом используются два разных, но математически связанных ключа. Существуют различные алгоритмы для реализации этого механизма шифрования: RSA, Diffie-Hellman, ECC (криптография на эллиптических кривых) и алгоритм цифровой подписи [3].

Шифрование на основе RSA с большим модулем и, соответственно, большим ключом, позволяет также надежно сохранять данные.

Рассмотрим реализацию алгоритма шифрования в системе Wolfram Mathematica.

Вначале подключаем кодировщик данных с помощью следующей команды:

```
enc=NetEncoder["UTF8"].
```

Вывод набора первых последовательных простых чисел может быть получен с помощью следующей команды:

```
Table[Prime[n],{n,20}].
```

Выбираем два простых числа из списка: $p = 59$, $q = 61$. Находим их произведение $max = pq$. Вычисляем функцию Эйлера $\varphi = (p - 1)(q - 1)$. В этом случае ее значение для данных чисел равно 3480.