

МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕЖФАЗНЫМ СЛОЕМ

¹Шилько С.В., ^{1,2}Черноус Д.А., ³Панин С.В.

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем
имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Работоспособность высоконагруженных трибосопряжений во многом определяется прочностными и теплофизическими характеристиками используемых материалов. Представляет интерес применение высокоэффективных полимеров с дисперсным углеродным наполнителем, антифрикционное действие которого (как показано, например, в [1]), обусловлено армированием и демпфированием поверхностного слоя. Кроме того, известно [2], что наполнение матричной компоненты углеродом позволяет существенно повысить теплопроводность. Таким образом, можно прогнозировать существенное уменьшение температуры в зоне трения за счет отвода тепла, что особенно актуально при создании композиционных материалов для тормозов, сцеплений и т.п., в которых фрикционный слой адгезионно соединен с металлической основой.

Однако исследования по разработке углеродсодержащих материалов для эффективного теплоотвода применительно к изделиям электроники [3] показали определенные проблемы по достижению желаемых теплофизических показателей. Они связаны с отсутствием прогнозирующих моделей теплопроводности из-за весьма малой толщины формирующегося межфазного слоя (50–100 нм) в сравнении с характерным размером частиц наполнителя (50–100 мкм), что затрудняет численный (например, конечно-элементный) анализ.

Целью исследования является разработка аналитического метода описания процесса распространения тепла с учетом термосопротивления границы раздела компонентов (матрицы и наполнителя).

Используемое в настоящее время соотношение для граничного теплового сопротивления между компонентами имеет вид

$$R_{m \rightarrow f} = \frac{2(\rho_m v_m + \rho_f v_f)^2 v_f}{c_m \rho_m^2 v_m^4 \rho_f}$$

Здесь v_m, v_f – эквивалентная скорость звука в материале матрицы и наполнителя соответственно; ρ_m, ρ_f – плотность материалов матрицы и наполнителя соответственно; C_m – удельная теплоемкость материала матрицы.

Недостатками такого описания является рассмотрение только одного направления теплового потока (от матрицы к наполнителю) и невозможность расчета граничного теплового сопротивления между компонентами с близкими значениями характеристик.

Предлагается альтернативное описание

$$R_{f \leftrightarrow m} = R_{m \rightarrow f} - R_{f \rightarrow m} = \frac{2(\rho_f v_f + \rho_m v_m)^2 |c_f \rho_f v_f^3 - c_m \rho_m v_m^3|}{(\rho_f v_f \rho_m v_m)^2 c_m c_f v_{\min}^2},$$

$$v_{\min} = \min(v_f, v_m).$$

Уточненный метод расчета теплопроводности основан на модели Такаянаги (рис. 1), гипотезе составного включения и эквивалентной матрицы. Исходными данными являются: a – минимальный диаметр частицы; χ – коэффициент анизотропии частицы (отношение наименьшего размера к наибольшему); h – толщина покрытия; φ – объемная доля частиц.

Вычисляемые параметры: b, a_0, b_0 определяются по формулам

$$b = \frac{a}{\chi}, \quad \frac{(a+2h)^2(b+2h)}{a_0^2(a_0+b-a)} = \varphi, \quad b_0 = a_0 + b - a.$$

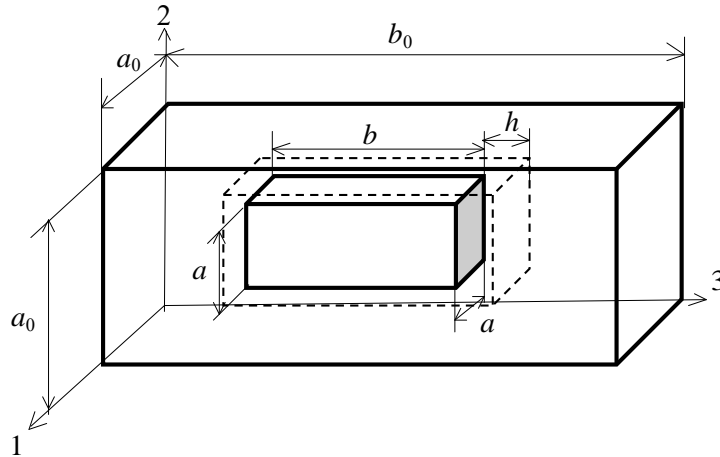


Рис. 1. Модель Такаянаги анизотрического включения с покрытием

Коэффициент теплопроводности вычисляется по осям 1 и 3 следующим образом:

$$\lambda_1 = \frac{1}{a_0 b_0} [ab\lambda_1' + ((a+2h)(b+2h) - ab)\lambda_1'' + (a_0 b_0 - (a+2h)(b+2h))\lambda_m],$$

$$\lambda_1' = a_0 \left[\frac{a}{\lambda_f} + \frac{2h}{\lambda_l} + \frac{a_0 - a - 2h}{\lambda_m} + 2R_{f-l} + 2R_{l-m} \right]^{-1},$$

$$\lambda_1'' = a_0 \left[\frac{a+2h}{\lambda_f} + \frac{a_0 - a - 2h}{\lambda_m} + 2R_{l-m} \right]^{-1},$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{a_0^2} [a^2\lambda_3' + ((a+2h)^2 - a^2)\lambda_3'' + (a_0^2 - (a+2h)a)\lambda_m],$$

$$\lambda_3' = b_0 \left[\frac{b}{\lambda_f} + \frac{2h}{\lambda_l} + \frac{b_0 - b - 2h}{\lambda_m} + 2R_{f-l} + 2R_{l-m} \right]^{-1},$$

$$\lambda_3'' = b_0 \left[\frac{b+2h}{\lambda_f} + \frac{b_0 - b - 2h}{\lambda_m} + 2R_{l-m} \right]^{-1},$$

где λ_f , λ_l , λ_m – коэффициент теплопроводности материалов наполнителя (алмаз), покрытия и матрицы соответственно; R_{f-l} , R_{l-m} – термосопротивление границы раздела «наполнитель-покрытие» и «покрытие-матрица» соответственно.

Усредненный коэффициент теплопроводности при хаотической ориентации частиц рассчитывается по формуле:

$$\lambda_c = \frac{1}{3}(2\lambda_1 + \lambda_3).$$

Проведенный мезомеханический анализ позволяет вычислить оптимальное объемное содержание, форму частиц дисперсного наполнителя и толщину модифицирующего покрытия) по критерию максимальной теплопроводности.

Исследование поддержано БРФФИ (проекты T22КИ-032 «Эволюция микроструктуры и стабильность термических свойств композитов алмаз/алюминий при термоциклировании») и T22КИТГ-003 «Высокопроизводительная технология модифицирования алюминиево-алмазных композиционных материалов для терморегулирования»). С.В. Панин благодарит поддержку проекта государственного задания ИФПМ СО РАН FWRW-2021-0010.

1. Антифрикционные и механические свойства термопластичных углеродных композитов на основе полиэфирэфиркетона / С.В. Панин, Ань Нгуен Дык, Л.А. Корниенко, В.О. Алексенко, Д.Г. Буслович, С.В. Шилько // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 4. – С. 427–435.
2. Khan J., Momin S. A., Mariatti M. A review on advanced carbon-based thermal interface materials for electronic devices // Carbon. – 2020. – Vol. 168. – P. 65–112. – DOI:10.1016/j.carbon.2020.06.012.
3. Giri A., Hopkins P. E. A review of experimental and computational advances in thermal boundary conductance and nanoscale thermal transport across solid interfaces // Adv. Funct. Mater. – 2019. – Vol. 30 (8). – 1903857.