

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

Сотовый наполнитель (СЗ) является одним из наиболее распространенных конструкционных материалов, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике [1].

Сэндвичевые (трехслойные) изделия данного класса в процессе эксплуатации подвержены интенсивному тепловому нагреву, что предопределяет необходимость развития методов их оптимального проектирования при учете теплового воздействия наравне с силовым [2, 3]. При этом для поиска рациональной высоты и геометрических параметров СЗ необходимо учитывать не только их влияние на его приведенные физико-механические характеристики, но и на теплофизические, в частности на теплопроводность.

В силу того, что СЗ по сути является дискретной конструкцией, состоящей из связанных между собой регулярно повторяющихся пластин из одного и двух слоев наполнителя (материала, из которого изготавливаются соты), до настоящего времени отсутствуют общепринятые методы, позволяющие определять его эффективный коэффициент теплопроводности. Поэтому оценку его величины для сэндвичевых конструкций обычно проводят по результатам обработки дорогостоящих испытаний [4, 5].

С точки зрения теплофизики процесс теплообмена в СЗ может быть описан методом электротепловой аналогии (МЭТА), позволяющим свести расчет рассматриваемой тепловой системы к расчету аналогичной электрической схемы [6].

Ранее в работе [7] для исследования тепловой деформативности каркасов панелей солнечных батарей СЗ, изготовленный из алюминиевой фольги, был рассмотрен как система параллельно и последовательно соединенных термических сопротивлений фольги, воздуха и клея. Предложенный в данной работе подход позволил определить только величину эффективного коэффициента теплопроводности СЗ для ячейки правильной шестигранной формы. Поэтому представляется оправданным для определения зависимости эффективного коэффициента теплопроводности СЗ от его геометрических параметров и толщины клеевых прослоек, соединяющих грани наполнителя между собой и с НС, обобщить полученные ранее результаты для ячейки сотов неправильной шестигранной формы в плане.

Практический интерес представляет определение не только эффективного коэффициента теплопроводности изолированного СЗ, но и СЗ с клеевой прослойкой на торцах. При соединении СЗ с НС клей может быть нанесен пленочно на всю поверхность НС [8] или адресно – только на торцы сотов [9]. Учитывая вышесказанное, эффективный коэффициент теплопроводности СЗ будем определять для следующих случаев:

- без учета клея;
- с учетом клеевой прослойки, соединяющей грани наполнителя СЗ;
- с учетом пленочной клеевой прослойки, связывающей СЗ с НС;
- с учетом адресной клеевой прослойки, нанесенной на торцы сотов.

Для рассмотрения процесса теплообмена в СЗ выделим представительный элемент с неправильной шестигранной ячейкой высотой $h_{СЗ}$, вид которого показан на рис. 1.

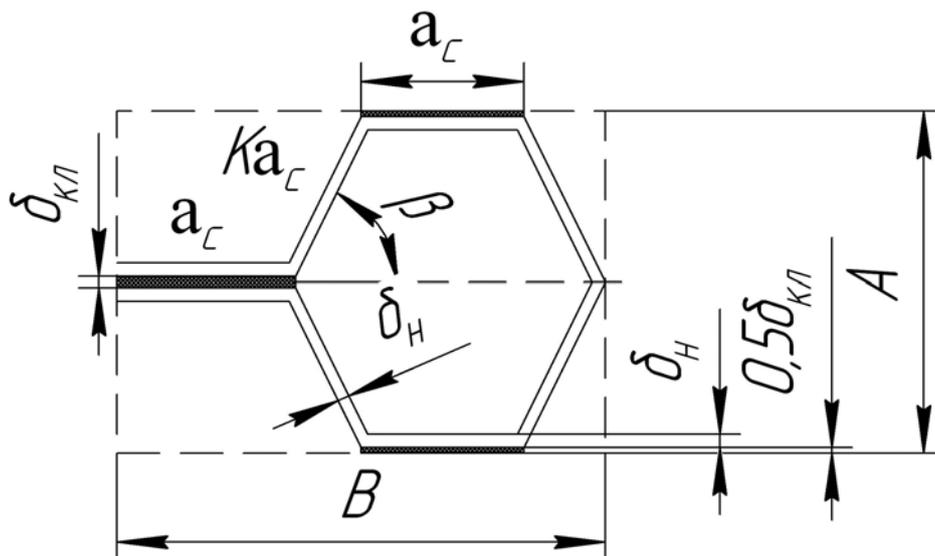


Рисунок 1 – Представительный элемент СЗ неправильной шестигранной формы: δ_H – толщина наполнителя, из которого изготавливается СЗ; a_c – ширина соединительной стороны, по которой происходит склейка ячеек между собой при образовании сотоблока; K , β – коэффициент формы и угол раскрытия СЗ; $\delta_{кл}$ – толщина клеевой прослойки, соединяющей ячейки СЗ

Для определения термических сопротивлений составляющих представительного элемента вычислим площади, по которым проходит теплопередача:

- СЗ без учета клея:

$$S_{ПЭ} = A \cdot B = 4a_c(2\delta_H + Ka_c \cdot \sin\beta)(1 + K \cdot \cos\beta); \quad (1)$$

$$S_H = 4a_c\delta_H(1 + K); \quad (2)$$

$$S_e = S_{ПЭ} - S_H = 4a_c(\delta_H(1 + 2K \cdot \cos\beta - K) + Ka_c \cdot \sin\beta(1 + K \cdot \cos\beta)), \quad (3)$$

где $S_{ПЭ}$ – площадь контакта всего представительного элемента с несущими слоями (НС);

S_H – площадь контакта наполнителя СЗ с НС;

S_e – площадь контакта воздуха с НС;

– СЗ с учетом клеевой прослойки, соединяющей грани его наполнителя:

$$S_{ПЭ} = A \cdot B = 4a_c(2\delta_H + Ka_c \cdot \sin\beta + \delta_{кл})(1 + K \cdot \cos\beta); \quad (4)$$

$$S_H = 4a_c\delta_H(1 + K); \quad (5)$$

$$S_{кл} = 2a_c\delta_{кл}; \quad (6)$$

$$S_e = S_{ПЭ} - S_H - S_{кл} = 4a_c \left(\delta_H(1 + 2K \cdot \cos\beta - K) + Ka_c \cdot \sin\beta \times \right. \\ \left. \times (1 + K \cdot \cos\beta) + \delta_{кл}(0,5a_c + K \cdot \cos\beta) \right), \quad (7)$$

где $S_{кл}$ – площадь контакта клеевой прослойки, связывающей наполнитель СЗ с НС.

В соответствии с МЭТА заменим представительный элемент СЗ на систему параллельно соединенных термических сопротивлений наполнителя и воздуха (рис. 2).

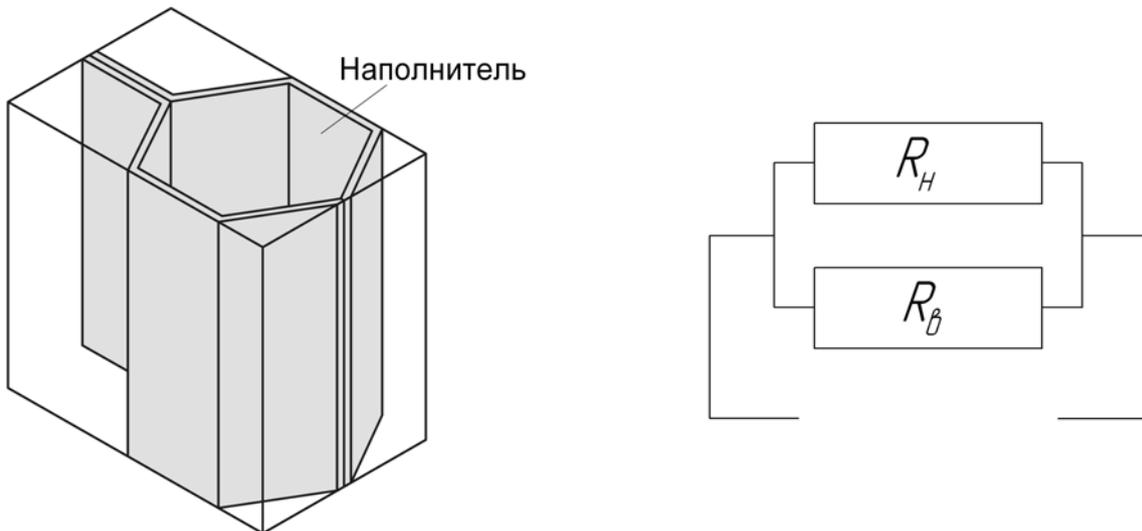


Рисунок 2 – Представительный элемент СЗ без учета клея и соответствующая ему электрическая схема

Общее термическое сопротивление полученной электрической схемы найдем согласно правилу параллельно включенных сопротивлений:

$$\frac{1}{R_{СЗ}} = \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_e}, \quad (8)$$

где $R_{C3} = \frac{h_{C3}}{\lambda_{C3} S_{ПЭ}}$ – общее термическое сопротивление С3;

$R_H = \frac{h_{C3}}{\lambda_H S_H}$ – термическое сопротивление наполнителя С3;

$R_в = \frac{h_{C3}}{\lambda_в S_в}$ – термическое сопротивление заполняющего соты воздуха;

$\lambda_H, \lambda_в$ – коэффициенты теплопроводности материала наполнителя С3 и воздуха.

Тогда эффективный коэффициент теплопроводности С3 без учета клея

$$\lambda_{C3} = \frac{\lambda_H \delta_H (1+K)}{(2\delta_H + Ka_c \cdot \sin \beta)(1+K \cdot \cos \beta)} + \frac{\lambda_в (\delta_H (1+2K \cdot \cos \beta - K) + Ka_c \cdot \sin \beta (1+K \cdot \cos \beta))}{(2\delta_H + Ka_c \cdot \sin \beta)(1+K \cdot \cos \beta)}. \quad (9)$$

Введя обозначение для плотности С3 [4] (10)

$$\rho_{C3} = \frac{\delta_H \rho_H (1+K)}{(\delta_H + Ka_c \cdot \sin \beta)(1+K \cdot \cos \beta)}, \quad (10)$$

выражение (9) преобразуем к виду (11)

$$\lambda_{C3} = \frac{\lambda_H + \lambda_в (C\bar{\rho} - 1)}{C\bar{\rho}}, \quad (11)$$

где $C = \frac{2\delta_H + Ka_c \cdot \sin \beta}{Ka_c \cdot \sin \beta}$; $\bar{\rho} = \frac{\rho_H}{\rho_{C3}}$.

Учет клея, соединяющего грани фольги между собой, приводит к добавлению соответствующего термического сопротивления в схему параллельно соединенных сопротивлений фольги и воздуха (рис. 3).

Общее термическое сопротивление полученной электрической схемы определим следующим образом:

$$\frac{1}{R_{C3}} = \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{кл}} + \frac{1}{R_в}, \quad (12)$$

где $R_{кл} = \frac{h_{C3}}{\lambda_{кл} S_{кл}}$ – термическое сопротивление клеевой прослойки, соединяющей грани наполнителя С3; $\lambda_{кл}$ – коэффициент теплопроводности клея, соединяющего грани С3.

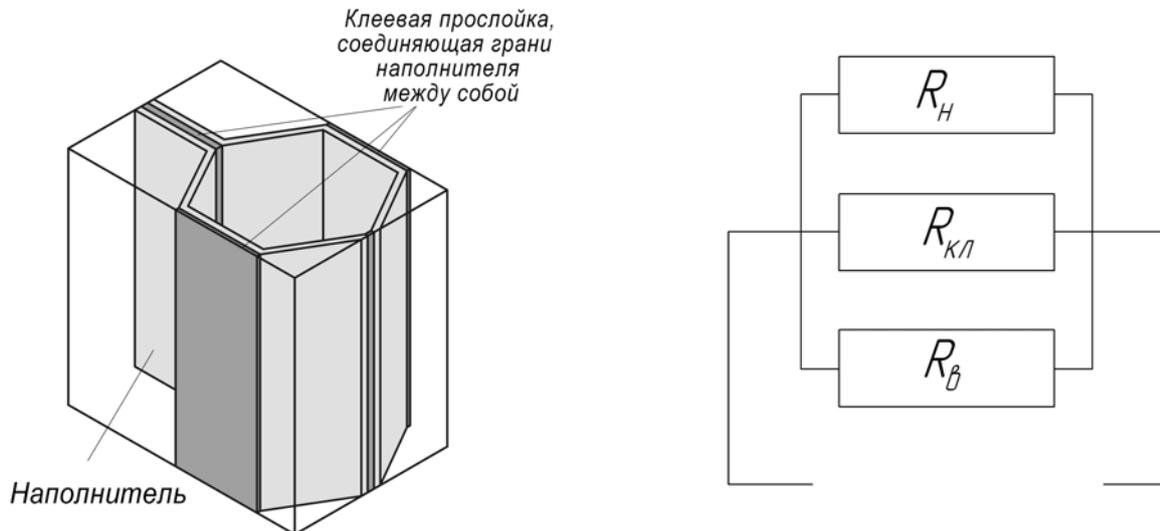


Рисунок 3 – Представительный элемент С3 с учетом клея, соединяющего грани наполнителя, и соответствующая ему электрическая схема

Эффективный коэффициент теплопроводности С3 примет вид

$$\lambda_{C3} = \frac{\lambda_H S_H + \lambda_{кл} S_{кл} + \lambda_в S_в}{S_{ПЭ}}. \quad (13)$$

При учете пленочной клеевой прослойки между С3 и НС согласно МЭТА электрическая схема представительного элемента примет вид, показанный на рис. 4.

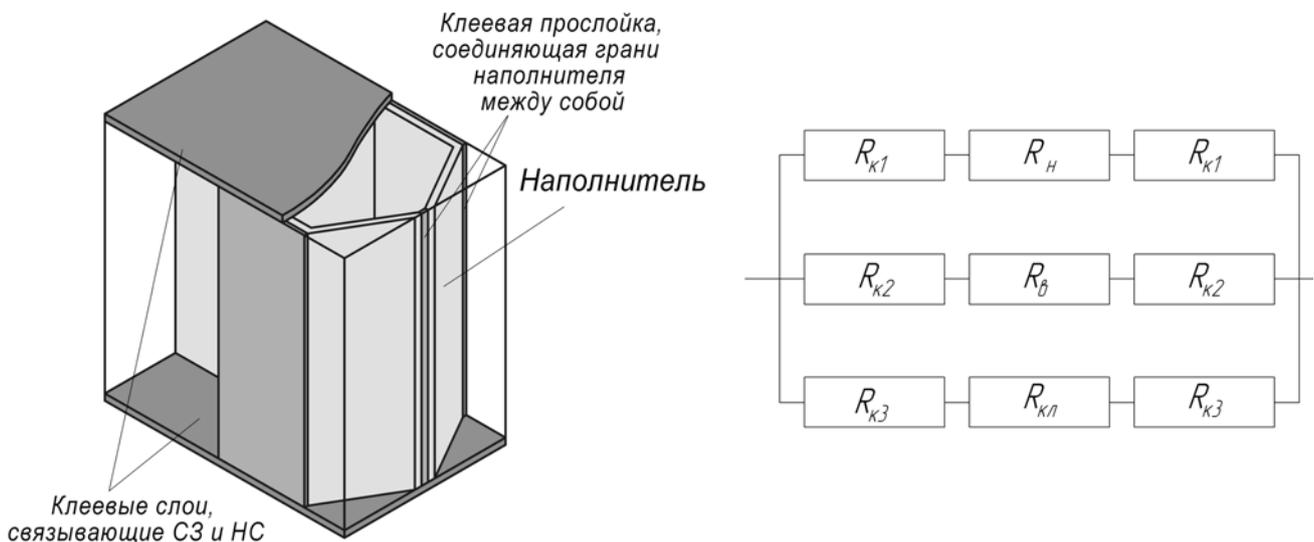


Рисунок 4 – Представительный элемент С3 с пленочной клеевой прослойкой и соответствующая ему электрическая схема

Результирующая тепловая проводимость С3 согласно этой схеме определится выражением

$$\frac{1}{R_{C3}} = \frac{1}{2R_{к1} + R_H} + \frac{1}{2R_{к2} + R_в} + \frac{1}{2R_{к3} + R_{кл}}, \quad (14)$$

где $R_{C3} = \frac{h_{C3} + 2h_K}{\lambda_{C3}S_{ПЭ}}$ – общее термическое сопротивление C3;

$R_{K1} = \frac{h_K}{\lambda_K S_H}$ – термическое сопротивление клеевого слоя, соединяющего C3 и HC, для площади контакта наполнителя с HC;

$R_{K2} = \frac{h_K}{\lambda_K S_e}$ – термическое сопротивление клеевого слоя, соединяющего C3 и HC, для площади контакта воздуха с HC;

$R_{K3} = \frac{h_K}{\lambda_K S_{кл}}$ – термическое сопротивление клеевого слоя, соединяющего C3 и HC, для площади контакта клеевой прослойки, связывающей наполнитель с HC;

h_K – толщина клеевого слоя, связывающего C3 с HC;

λ_K – коэффициент теплопроводности клея, соединяющего C3 с HC.

Эффективный коэффициент теплопроводности C3 найдем следующим образом:

$$\lambda_{C3} = \frac{h_{C3} + 2h_K}{S_{ПЭ}} \cdot \left(\frac{1}{2R_{K1} + R_H} + \frac{1}{2R_{K2} + R_e} + \frac{1}{2R_{K3} + R_{кл}} \right). \quad (15)$$

На рис. 5 показан представительный элемент C3 с клеевым слоем, нанесенным адресно на торцы сотов, и соответствующая ему электрическая схема.

Общее термическое сопротивление найдем по формуле

$$\frac{1}{R_{C3}} = \frac{1}{2R_{K1} + R_H} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{2R_{K3} + R_{кл}}, \quad (16)$$

где $R_{C3} = \frac{h_{C3} + 2h_K}{\lambda_{C3}S_{ПЭ}}$, $R_e = \frac{h_{C3} + 2h_K}{\lambda_e S_e}$.

Тогда эффективный коэффициент теплопроводности C3

$$\lambda_{C3} = \frac{h_{C3} + 2h_K}{S_{ПЭ}} \cdot \left(\frac{1}{2R_{K1} + R_H} + \frac{1}{R_e} + \frac{1}{2R_{K3} + R_{кл}} \right). \quad (17)$$

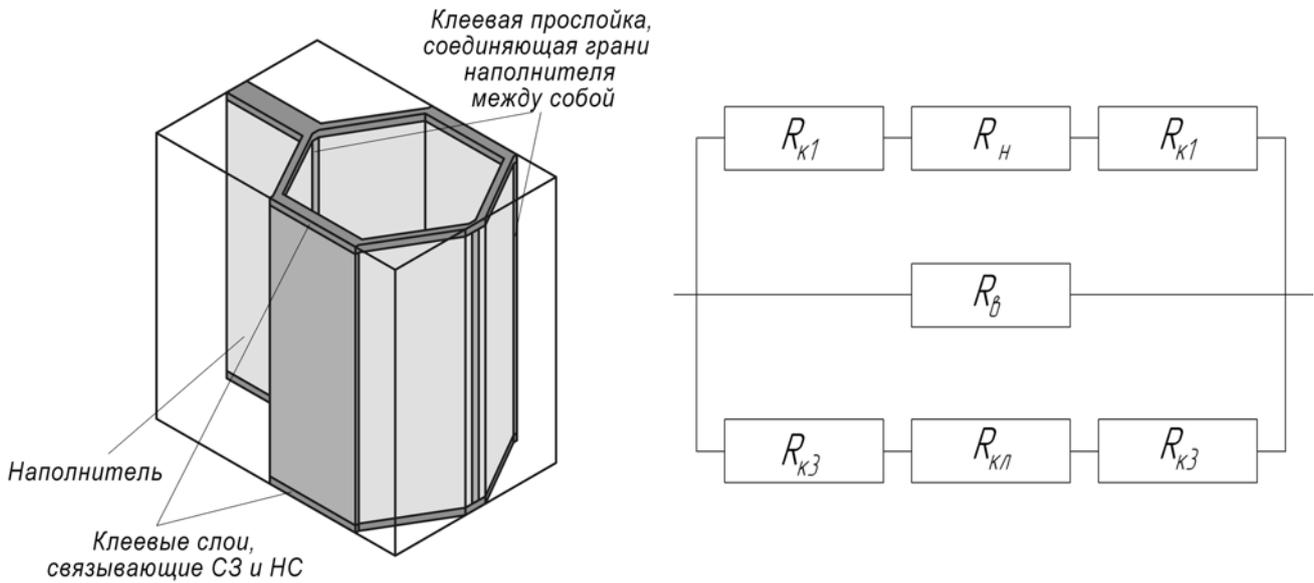


Рисунок 5 – Представительный элемент СЗ с клеевым слоем, нанесенным адресно на торцы сот, и соответствующая ему электрическая схема

На рис. 6 – 11 показаны графики зависимости эффективного коэффициента теплопроводности СЗ от его высоты, размера грани ячейки и различной толщины клеевой прослойки, определенные в соответствии с полученными выше формулами. В качестве материала для СЗ была выбрана алюминиевая фольга толщиной $\delta_H = 0,04$ мм.

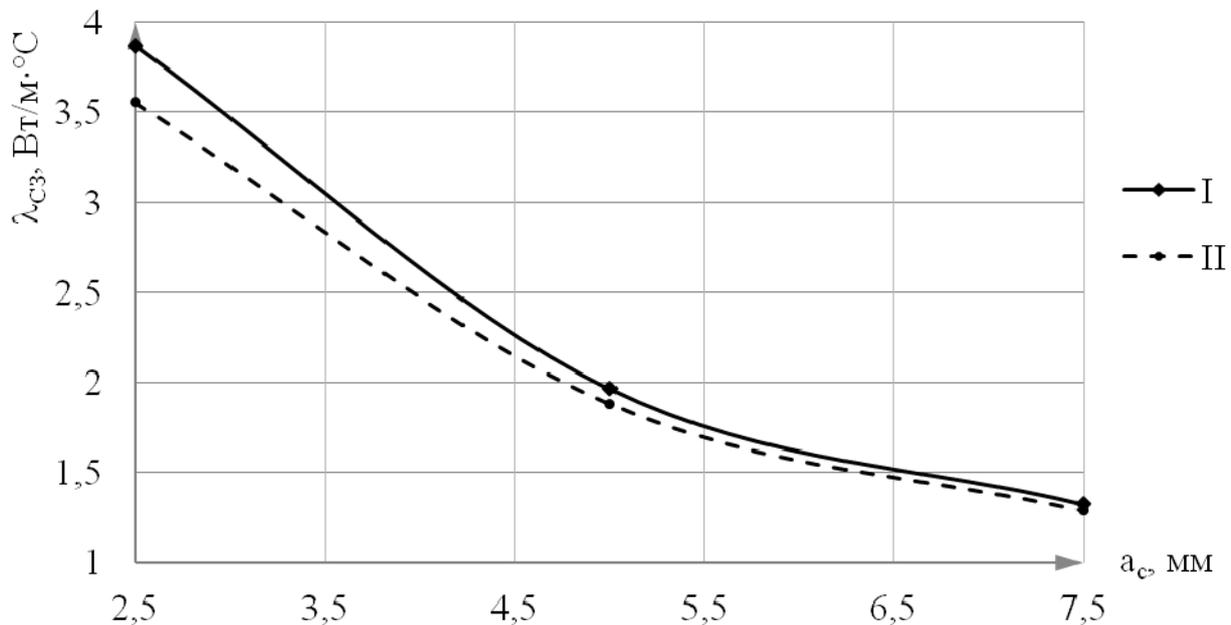


Рисунок 6 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности изолированного СЗ в зависимости от величины грани ячейки ($h_{сз} = 15$ мм):

I – без учета клея; II – с учетом клеевой прослойки, соединяющей грани фольги

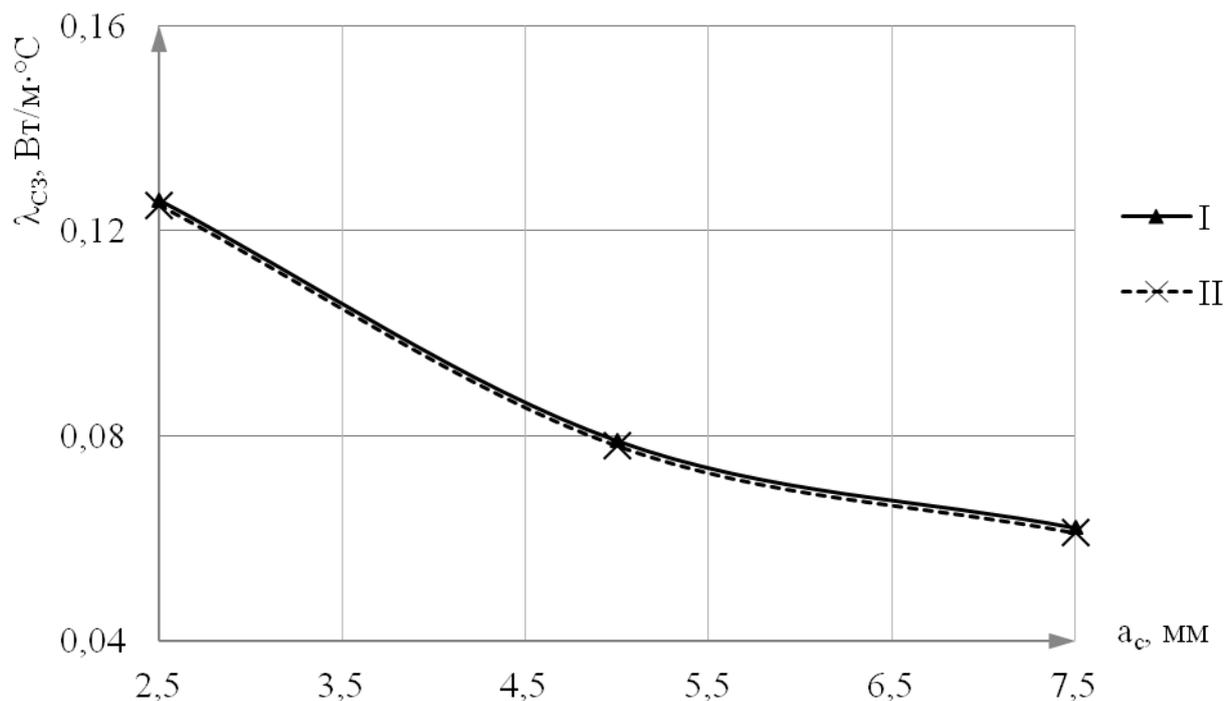


Рисунок 7 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности СЗ с клеем на торцах в зависимости от величины грани ячейки (при $h_{СЗ} = 15$ мм):

I – пленочное нанесение клея; II – адресное нанесение клея на торцы сотов

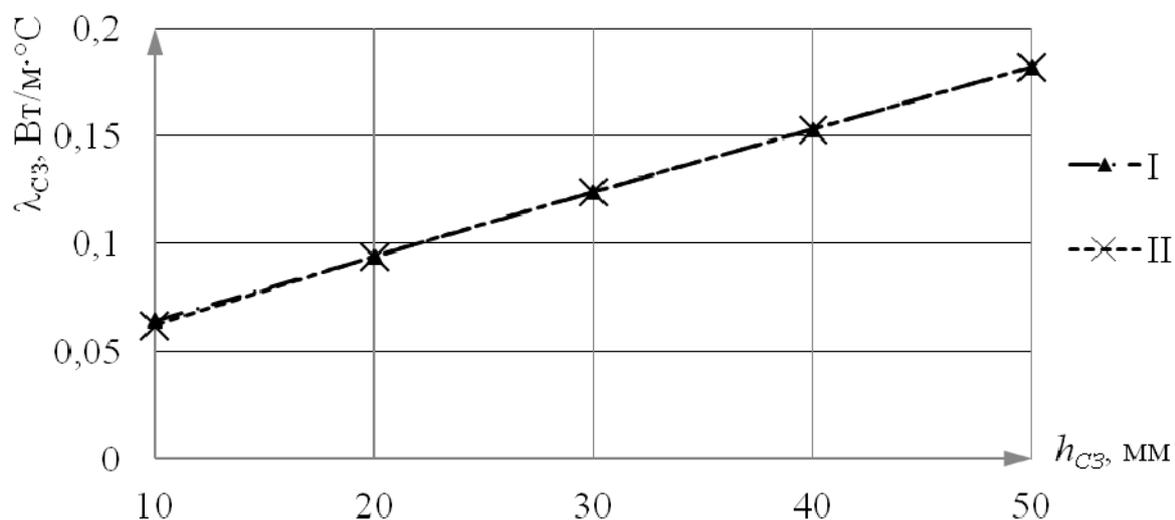


Рисунок 8 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности СЗ с клеем на торцах в зависимости от его высоты (при $a_c = 5$ мм):

I – пленочное нанесение клея; II – адресное нанесение клея на торцы сотов

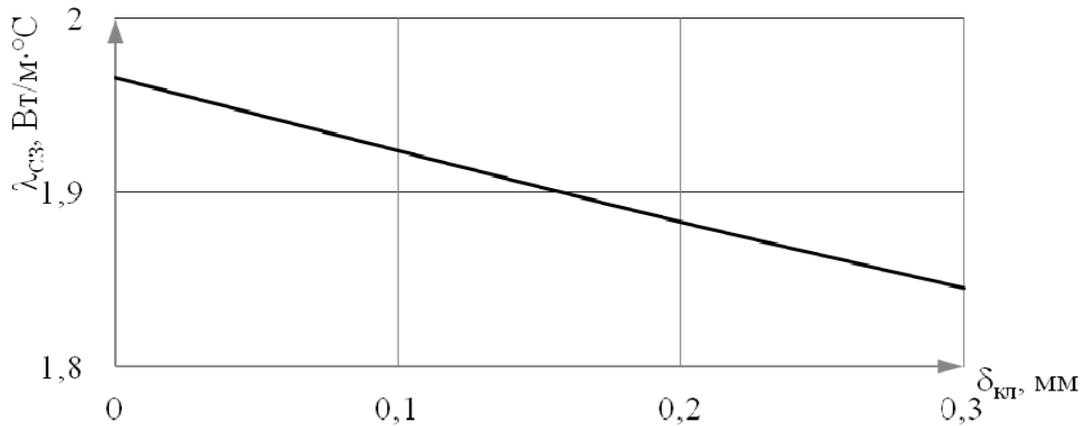


Рисунок 9 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности изолированного СЗ в зависимости от толщины клеевой прослойки, соединяющей грани фольги между собой ($h_{\text{СЗ}} = 15 \text{ мм}$, $a_{\text{с}} = 5 \text{ мм}$)

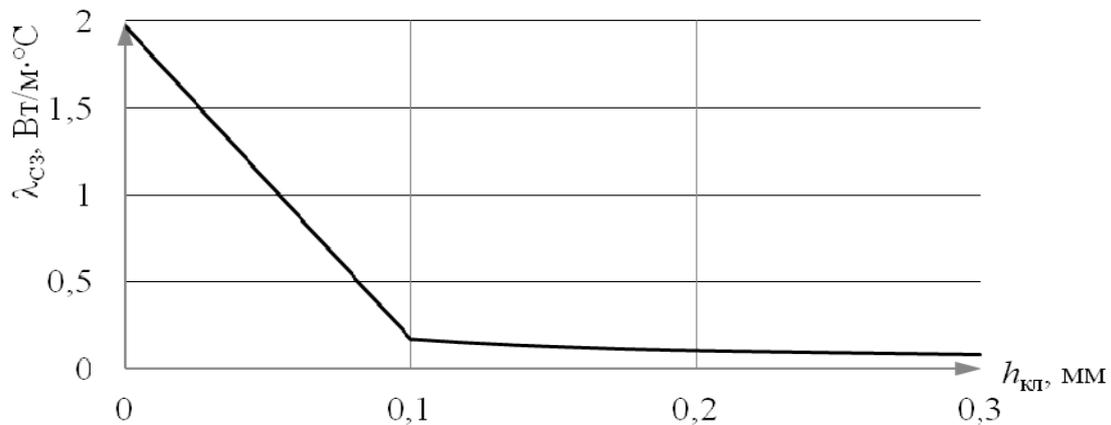


Рисунок 10 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности СЗ в зависимости от толщины клеевого слоя, связывающего СЗ и НС, при нанесении клея на всю поверхность НС (пленочное) ($h_{\text{СЗ}} = 15 \text{ мм}$, $a_{\text{с}} = 5 \text{ мм}$)

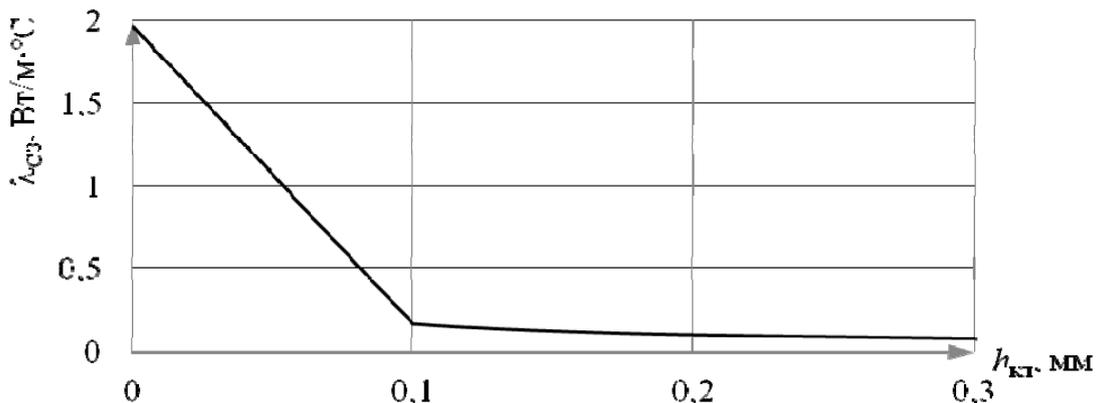


Рисунок 11 – Характер изменения эффективного коэффициента теплопроводности СЗ в зависимости от толщины клеевого слоя, связывающего СЗ и НС, при нанесении клея на торцы соты (адресное) ($h_{\text{СЗ}} = 15 \text{ мм}$, $a_{\text{с}} = 5 \text{ мм}$)

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Эффективный коэффициент теплопроводности СЗ с увеличением размера грани ячейки уменьшается. Так, в рассматриваемом диапазоне изменения величины грани ячейки сотов $2,5 \leq a_c \leq 7,5$ мм различие между максимальным и минимальным коэффициентами теплопроводности СЗ составляет более чем 2,9 раза.

2. Эффективный коэффициент теплопроводности СЗ с ростом его высоты увеличивается. Так, в рассматриваемом диапазоне изменения высоты сотов $10 \leq h_{СЗ} \leq 50$ мм различие между минимальной величиной теплопроводности СЗ и максимальной составляет более чем 2,3 раза. Однако следует отметить, что наблюдаемая зависимость коэффициента теплопроводности СЗ от его высоты, полученная на основе МЭТА, может быть выявлена лишь при рассмотрении СЗ с клеевой прослойкой, связывающей его с НС. Рассмотренный метод не позволил в явном виде выявить эту зависимость для изолированного СЗ. Поэтому в этом направлении требуется проведение дополнительных исследований.

3. Влияние на эффективный коэффициент теплопроводности СЗ клеевой прослойки, соединяющей его грани, незначительно. Так, для грани ячейки сотов $a_c = 2,5$ мм различие между величинами коэффициента теплопроводности СЗ с учетом клеевой прослойки и без нее не превышает 9%, а для $a_c = 7,5$ мм – 3%. Влияние толщины самой клеевой прослойки также незначительно. Так, различие между величинами коэффициента теплопроводности при изменении толщины клеевой прослойки в диапазоне 0,1...0,3 мм не превышает 4%.

4. Существенное влияние на теплопроводность СЗ оказывает клеевая прослойка, связывающая его с НС. Так, эффективная теплопроводность СЗ с клеем на торцах отличается от теплопроводности изолированного СЗ более чем в 11 раз. Это факт необходимо учитывать при выборе рациональной высоты СЗ, используя в качестве расчетного значение эффективного коэффициента теплопроводности не для изолированного СЗ, а для сотов с клеем на торцах.

5. Влияние на эффективный коэффициент теплопроводности СЗ с клеем на торцах толщины клеевой прослойки, соединяющей его с НС, существенно. Так, для грани ячейки сотов $a_c = 5$ мм различие между величинами коэффициента теплопроводности при изменении толщины клеевой прослойки в диапазоне 0,1...0,3 мм составляет более чем 50%. В то же время влияние способа нанесения клея (пленочное или адресное) незначительно – не более 1%.

Список использованных источников

1. Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – 200 с.
2. Марченко, В.М. Температурные поля и напряжения в конструкции летательных аппаратов [Текст] / В.М. Марченко. – М.: Машиностроение, 1965. – 298 с.
3. Кондратьев, А.В. Проектирование головных обтекателей ракет-носителей из полимерных композиционных материалов при одновременном тепловом и силовом воздействиях / А.В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (64). – Х., 2010. – С. 11–22.
4. Панин, В.Ф. Конструкции с заполнителем [Текст]: справ. / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 271 с.
5. Ендогур, А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование [Текст] / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
6. Фокин, В.М. Основы технической теплофизики [Текст] / Ф.М. Фокин, Г.П. Бойков, Ю.В. Видин. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
7. Тихий, В.Г. Исследование тепловой деформативности каркасов панелей солнечных батарей для микроспутников [Текст] / В.Г. Тихий, В.Д. Примаков, В.В. Судницын // Космическая техника. Ракетное вооружение: науч.-техн. сб. Нац. косм. агентства Украины ГKB "Южное" им. М.К. Янгеля. – Вып. 1-2. – Днепропетровск, 2006. – С. 168-177.
8. Берсудский, В.Е. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций [Текст] / В.Е. Берсудский, В.Н. Крысин, С.М. Лесных. – М.: Машиностроение, 1975. – 269 с.
9. Создание рационального клеевого соединения сотовых заполнителей с обшивками в конструкциях авиационно-космического назначения / В.Е. Гайдачук, Г.В. Ткаченко, О.А. Карпикова, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2009. – С. 148 – 155.

Поступила в редакцию 25.05.2012.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепропетровск