

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 161–170
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 4, pp. 161–170

Научная статья
УДК 536.21/629.7
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185064>
EDN: <https://www.elibrary.ru/UTJRGN>

Результаты расчетно-теоретического исследования влияния основных факторов на теплопроводность трехслойной сотовой панели

А.Ю. Ромanyak^{1✉}, А.К. Пузырева², И.В. Котович³, В.П. Киселев⁴, А.А. Глазков⁵,
Д.В. Моторин⁶

^{1,2}МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Российская Федерация

^{3,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

^{5,6}АО «ОНИИП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Российская Федерация

¹romanyak@bmstu.ru✉

Аннотация. Представлены результаты трехмерного численного моделирования теплопроводности трехслойной сотовой панели с учетом влияния боковых слоев, клеевого соединения и воздушной среды. Установлено, что при малых значениях теплопроводности боковых слоев, например, из углепластика, эквивалентная теплопроводность центрального слоя – сотового наполнителя и суммарная теплопроводность трехслойной сотовой панели оказываются ниже теоретических значений, полученных из известных формул. Показано, что классические одномерные модели теплопередачи не учитывают сложную трехмерную структуру сотовой панели и ее анизотропные свойства. Установлено, что увеличение теплопроводности и толщины боковых слоев приводит к росту эффективности теплообмена, однако эффект наиболее выражен при начальных значениях параметров. Исследовано влияние клеевого слоя, как теплового моста, и воздушной среды, увеличивающей суммарную теплопроводность за счет значительной контактной площади. Полученные результаты позволяют уточнить характеристики теплопередачи в композитных панелях и могут быть использованы при проектировании эффективных конструкций с заданными теплофизическими свойствами.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, анизотропия, клеевое соединение, воздушная среда, трехмерное моделирование

Для цитирования. Ромanyak А.Ю., Пузырева А.К., Котович И.В., Киселев В.П., Глазков А.А., Моторин Д.В. Результаты расчетно-теоретического исследования влияния основных факторов на теплопроводность трехслойной сотовой панели // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 4. С. 161–170. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185064>

Original article

Results of calculation-theoretical study of the influence of main factors on the thermal conductivity of a three-layer honeycomb panel

A.Yu. Romanyak^{1✉}, A.K. Puzyreva², I.V. Kotovich³, V.P. Kiselev⁴, A.A. Glazkov⁵, D.V. Motorin⁶

^{1,2}*BMSTU named N.E. Bauman, Moscow, Russian Federation*

^{3,4}*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

^{5,6}*JSC "OSPE 'Tekhnologiya' named A.G. Romashina", Obninsk, Russian Federation*

¹*romanyak@bmstu.ru✉*

Abstract. The paper presents the results of a three-dimensional numerical study of the thermal conductivity of a three-layer honeycomb panel, taking into account the influence of the face sheets, the adhesive bonding layer, and the surrounding air environment. The modeling was carried out using a three-dimensional finite element mesh built in the Siemens NX software suite. The research highlights the significant role played by the material properties and thicknesses of the face sheets in determining the overall heat transfer efficiency. It was found that at low thermal conductivity values of the face sheets, particularly those made of carbon fiber-reinforced plastics, the equivalent thermal conductivity of the honeycomb core and the total thermal conductivity of the panel are noticeably lower than the theoretical values predicted by conventional analytical models.

The classical one-dimensional heat transfer theories, typically used in engineering calculations, fail to account for the three-dimensional structure and anisotropic nature of honeycomb panels. Numerical simulations show that as the thermal conductivity and thickness of the face sheets increase, the heat transfer efficiency improves significantly. However, this enhancement is most evident at initial increases and gradually saturates with further growth of these parameters.

The study further investigates the role of the adhesive layer, which acts as an additional thermal bridge between the honeycomb core and the face sheets. It was observed that even small adhesive fillets with moderate thermal conductivity can considerably enhance the overall thermal conductivity, especially at low thicknesses and thermal conductivity values of the face sheets.

The contribution of the surrounding air was also examined. Despite the low thermal conductivity of air itself, the presence of air within the honeycomb structure resulted in up to an 11 % increase in the overall thermal conductivity due to the large contact surface area and the multi-directional nature of heat transfer.

Overall, the results demonstrate that the thermal conductivity of three-layer honeycomb panels can be substantially lower than theoretical predictions if the anisotropic and three-dimensional characteristics of the structure are not properly considered. These findings provide valuable insights for improving the design of composite materials with tailored thermal properties, especially for aerospace and high-performance engineering applications where precise thermal management is critical.

Keywords: thermal conductivity coefficient, anisotropy, adhesive bonding, air environment, three-dimensional modeling

For citation. Romanyak A.Yu., Puzyreva A.K., Kotovich I.V., Kiselev V.P., Glazkov A.A., Motorin D.V. Results of calculation-theoretical study of the influence of main factors on the thermal conductivity of a three-layer honeycomb panel. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 161–170. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185064>

1. Введение

В настоящее время в различных областях широко применяются трехслойные сотовые панели, отличающиеся высокими прочностными характеристиками при низкой плотности. Такое сочетание свойств имеет важное значение для конструктивных элементов образцов ракетно-космической техники. Особенностью рассматриваемых материалов является анизотропия теплопроводности слоев, приводящая к различию тепловых характеристик в разных направлениях. Это позволяет создавать композитные материалы с заданными теплофизическими свойствами, однако затрудняет применение известных расчетных формул для определения эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойного материала. Неточности тепловых расчетов приходится компенсировать введением коэффициентов запаса, что может существенно снижать эффективность применения материалов с малой плотностью.

В связи с этим численное и экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности трехслойной сотовой панели является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является численное определение эквивалентного коэффициента теплопроводности трехслойной сотовой панели с учетом влияния теплопроводности и толщины боковых слоев, анизотропии материалов, клеевого соединения и окружающей воздушной среды.

2. Методы исследования

Для определения эквивалентной теплопроводности трехслойной сотовой панели построена полностью трехмерная расчетная сетка в программном комплексе Siemens NX [1, 2] (рис. 1 а). Использование трехмерной модели позволяет учитывать перетекание тепла во всех направлениях.

Граничные условия постановки задачи заданы следующим образом: на одной из внешних стенок поддерживается постоянная температура, на противоположной стенке фиксирована плотность теплового потока (рис. 1 б).

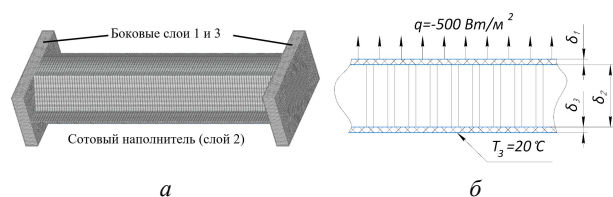


Рис. 1. Схема постановки задачи: а – общий вид трехмерной сетки; б – схема граничных условий

В качестве материала для сот применен алюминиевый сплав АМг2 со средней плотностью заполнения 45 кг/м³. Влияние теплового излучения в расчетах не учитывается ввиду его незначительного вклада [3, 4].

Из уравнения (1), решая обратную задачу относительно коэффициента теплопроводности ($\lambda_i, i = 2$) при известных теплофизических свойствах других используемых материалов ($\lambda_i, i = 1, 3$), можно определить эквивалентный коэффициент теплопроводности сотового наполнителя, а также суммарный коэффициент трехслойной сотовой панели.

$$q = \sum_{i=1}^3 \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_1 - T_3), \quad (1)$$

где λ_i и δ_i – коэффициент теплопроводности и толщина i -го слоя, T_1 и T_3 – температура 1 и 3 слоя; q – плотность теплового потока.

В рамках исследования рассматривались следующие факторы, влияющие на теплопроводность трехслойной структуры:

- изменение изотропной теплопроводности и толщины боковых слоев;
- анизотропия теплопроводности материалов боковых слоев в продольном и поперечном направлениях;
- наличие клеевого слоя, моделируемого с использованием характеристик клея ВК-36;
- влияние воздушной среды, заполняющей межклеточное пространство сот.

Моделирование анизотропных свойств боковых слоев выполнялось с различными значениями теплопроводности в продольном и поперечном направлениях. Теплопроводность в поперечном направлении принималась базовой, а продольная варьировалась в зависимости от параметра анизотропии β , который определяется, как отношение продольной теплопроводности к поперечной.

Клеевой слой учитывался в виде галтелей с различным радиусом скругления и теплопроводностью. Изменение радиуса галтели и характеристик клея учитывалось при расчете теплопередачи между боковыми слоями и сотовым наполнителем.

Воздушная среда моделировалась как твердое тело с эквивалентной теплопроводностью

воздуха. Такая замена допустима, поскольку более горячая поверхность в модели располагалась сверху, что исключало значимое развитие свободной конвекции и позволяло считать перенос тепла через воздух преимущественно теплопроводным.

Численные расчеты проводились для анализа зависимости эквивалентной теплопроводности от перечисленных факторов с последующим сопоставлением результатов с теоретическими одномерными моделями теплопередачи.

3. Результаты исследования

3.1. Влияние изотропной теплопроводности боковых слоев и ее толщины

Для исследования принимаем толщины слоев следующими: $\delta_1 = \delta_3 = 1$ мм; $\delta_2 = 20$ мм. Изменяя теплопроводность 1 и 3 слоя, зная температуру 1 слоя в результате численного моделирования, а также решая обратную задачу (1), получим следующую зависимость изменения теплопроводности 2 слоя от изменения теплопроводности 1 и 3 (рис. 2).

Воспользуемся формулой (2) для определения эквивалентной теплопроводности сотового наполнителя [4], и, подставив значения средней плотности сотового наполнителя, получим, что эквивалентная теплопроводность 2 слоя равна $\lambda_{C3} = 2,2$ Вт/(м×К):

$$\lambda_{C3} = \lambda_H \frac{\rho_{C3}}{\rho_H}, \quad (2)$$

где λ_{C3} и λ_H – соответственно коэффициенты теплопроводности сотового заполнителя и материала сот; ρ_{C3} и ρ_H – соответственно плотность сотового заполнителя и материала сот.

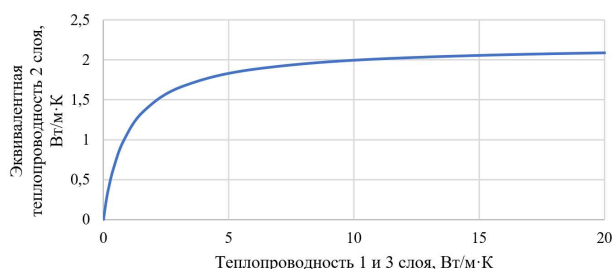


Рис. 2. Влияние теплопроводности 1 и 3 слоя на эквивалентную теплопроводность 2 слоя

Как видно из рис. 2, с увеличением теплопроводности боковых слоев 1 и 3 увеличивается

и теплопроводность слоя 2. При этом, начиная с $\lambda_1 = \lambda_3 > 15$ Вт/(м×К), λ_2 меньше теоретического максимального значения не более чем на 10 % от величины λ_{C3} . При дальнейшем увеличении $\lambda_1 = \lambda_3$, λ_2 стремится к λ_{C3} и достигает его при $\lambda_1 = \lambda_3 \approx 100$ Вт/м×К. Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании больших значений теплопроводности слоев 1 и 3 можно определить теплопроводность слоя 2.

При малых значениях теплопроводности слоев 1 и 3, теплопроводность слоя 2 и соответственно суммарная теплопроводность λ_Σ меньше, чем полученная из формулы (1). Это объясняется анизотропией конструкции трехслойной сотопанели. Боковые элементы способны проводить тепло как в поперечном, так и в продольном направлениях. При высокой теплопроводности они обеспечивают дополнительный канал для передачи тепловой энергии, что снижает общий температурный градиент в наполнителе. Напротив, снижение теплопроводности боковых панелей уменьшает их вклад в теплообмен, что приводит к увеличению общего термического сопротивления.

Кроме того, боковые панели выполняют функцию тепловых мостов, соединяя соты и способствуя равномерному распределению тепла по поверхности панели. При снижении их теплопроводности эффективность передачи тепла в продольном направлении уменьшается, что отражается на снижении эффективности теплообмена через соты.

На рис. 3 представлено распределение температуры по боковой поверхности (слой 3).

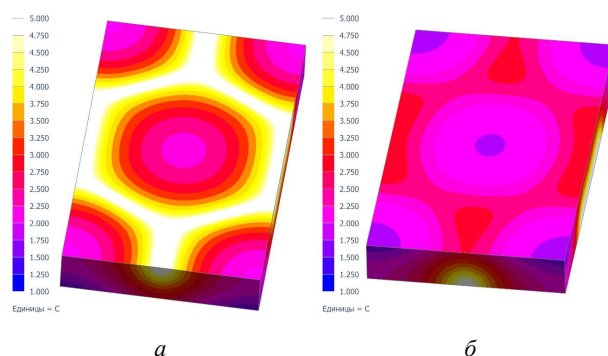


Рис. 3. Эпюра распределения температуры в слое 1: а – со стороны сот; б – лицевая сторона

Варьируя $\delta_1 = \delta_3$ и фиксируя значения $\lambda_1 = \lambda_3$, проведено аналогичное исследование изменения

эквивалентной теплопроводности слоя 3. Результаты представлены на рисунках 4 и 5.

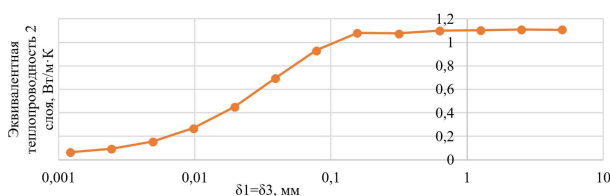


Рис. 4. Влияние толщины 1 и 3 слоя на эквивалентную теплопроводность 2 слоя при постоянном коэффициенте теплопроводности 1 и 3 слоя

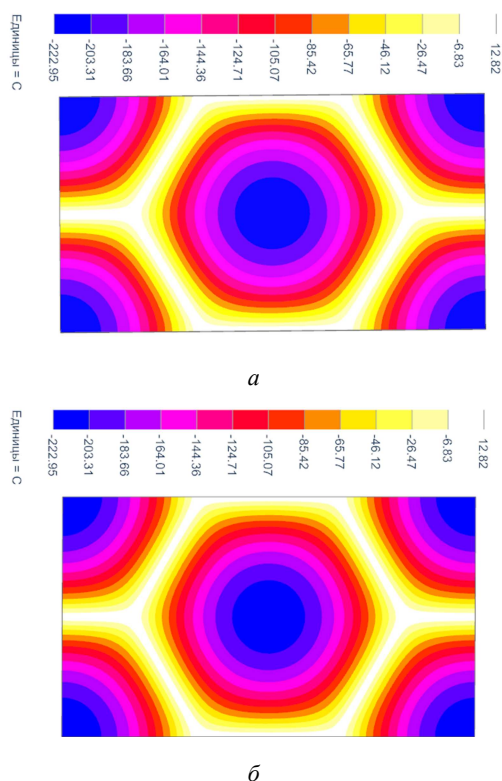


Рис. 5. Эпюра распределения температуры слоя 1 при толщине 1×10^{-5} м: а – со стороны сот; б – лицевая сторона

Анализ данных рисунков 3, 4 и 5 показывает, что при достаточной толщине боковых слоев тепло распределяется более равномерно от места контакта с сотами как в поперечном, так и в продольных направлениях. Однако при уменьшении толщины боковых слоев эффективность передачи тепла в продольных направлениях снижается. На рис. 5 видно, что при уменьшении толщины боковых слоев температурные эпюры на лицевой и обратной сторонах практически совпадают, так как недостаточная площадь поперечного сечения в продольном направлении не обеспечивает равномерного распределения тепла.

Влияние теплопроводности 1 и 3 слоя на переходный момент, при котором начинает снижаться эквивалентная теплопроводность сот, обусловлено размерами контакта сот с боковой поверхностью. Снижение эквивалентной теплопроводности происходит, когда отношение толщины слоев 1 и 3 к толщине грани ячейки (a_c) меньше 15, т.е. при $(\delta_1 = \delta_3)/a_c < 15$. Аналогичным образом возможно определение эквивалентной теплопроводности в остальных направлениях.

3.2. Влияние анизотропных свойств боковых слоев

В качестве боковых слоев могут использоваться различные композитные структуры [5–10]. При этом теплопроводность в поперечном и продольном направлении может отличаться в 10 и более раз [11–15]. Введем обозначения в соответствии с рисунками 1 и 6: теплопроводность каждого слоя обозначим как $\lambda_{i,j}$, где i – номер слоя, j – направление, при этом $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,3} = \lambda_{3,2} = \lambda_{3,3}$, $\lambda_{1,1} = \lambda_{3,1}$.

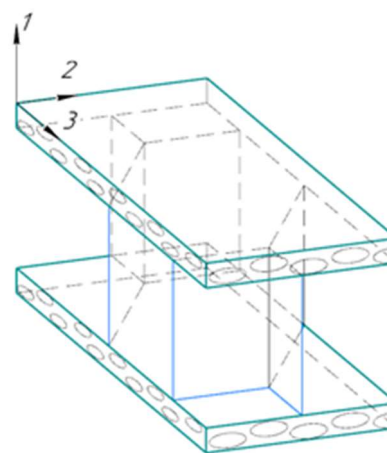
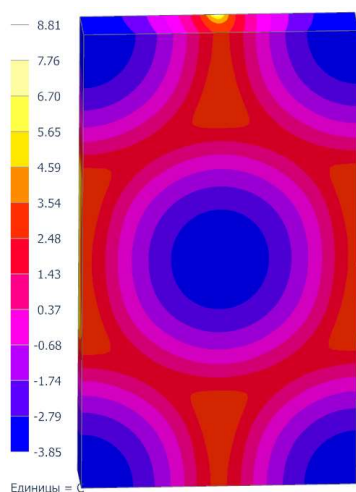


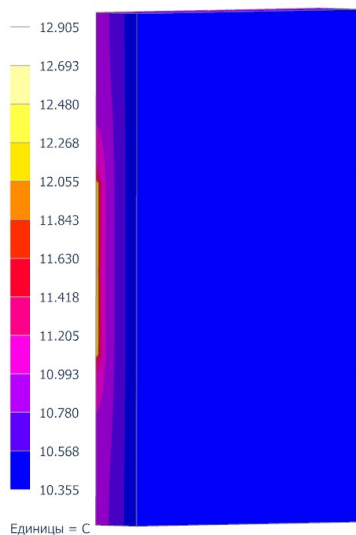
Рис. 6. Система координат в трехслойной сотовой панели

Для исследования примем, что в поперечном направлении $\lambda_{1,1} = \lambda_{3,1} = 0,7$ Вт/м·К.

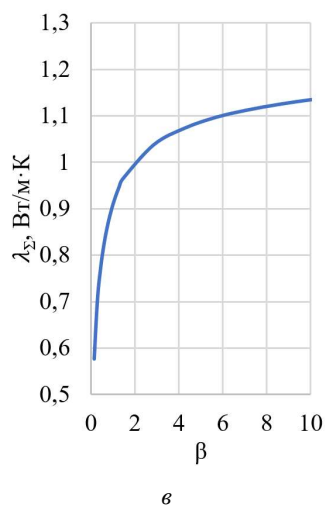
Получено, что при $\beta < 1$, λ_Σ меньше, чем если бы материал слоя 1 и 3 был изотропным ($\lambda_1 = \lambda_3 = 0,7$ Вт/м·К), а эпюра температуры схожа с представленной на рис. 3. Наоборот, при $\beta > 1$, λ_Σ увеличивается, но общий прирост по сравнению с изотропным вариантом составляет не более чем в 1,5 раза. На рис. 7 показаны эпюры температуры для β больше и меньше 1 и график изменения $\lambda_\Sigma(\beta)$.



а



б

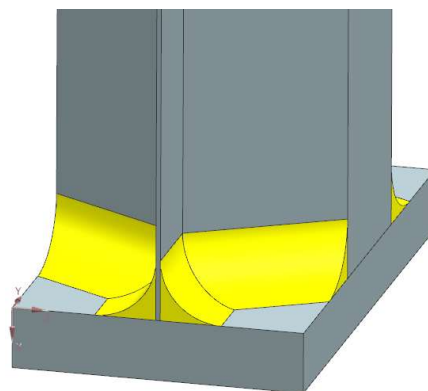


в

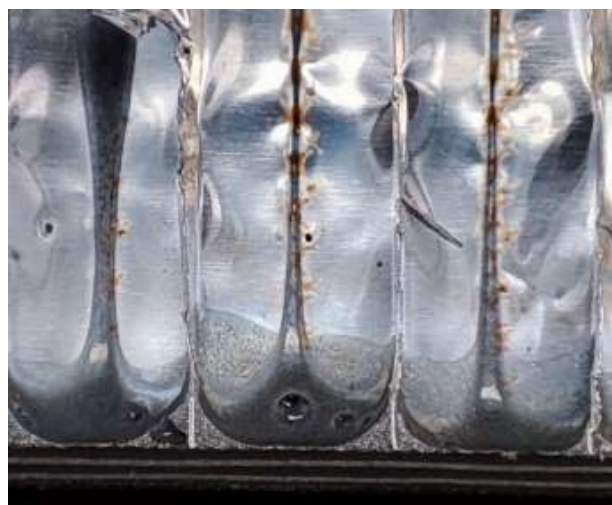
Рис. 7. Результаты влияния анизотропных свойств боковых слоев 1 и 3: а – эпюра температуры обратной стороны 1 слоя при $\beta < 1$; б – эпюра температуры обратной стороны 1 слоя при $\beta > 1$; в – изменение λ_z от β .

3.3. Влияние клеевого слоя

Для склеивания сот может применяться клей ВК-36 [6, 16], теплопроводность которого может достигать $\lambda_k = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в зависимости от присадок. На рис. 8 показаны идеализированные представления галтелей клеевой пленки и реальное их изображение. Радиус скругления галтелей варьировался, как и теплопроводность клея. Материал 1 и 3 слоя также принимается ортотропным $\beta = 10$, $\lambda_{1,1} = \lambda_{3,1} = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.



а



б

Рис. 8. Клеевой слой: а – идеализированный; б – реальная картина галтелей на образце

Клеевой слой образует дополнительный тепловой мост для передачи тепла от боковых слоев к сотам, как показано на рис. 8 а. Из-за значительно большей площади теплопередачи по сравнению с поперечной площадью сот, это может вносить существенный вклад. На рис. 9 показаны результаты исследования влияния клеевого слоя.

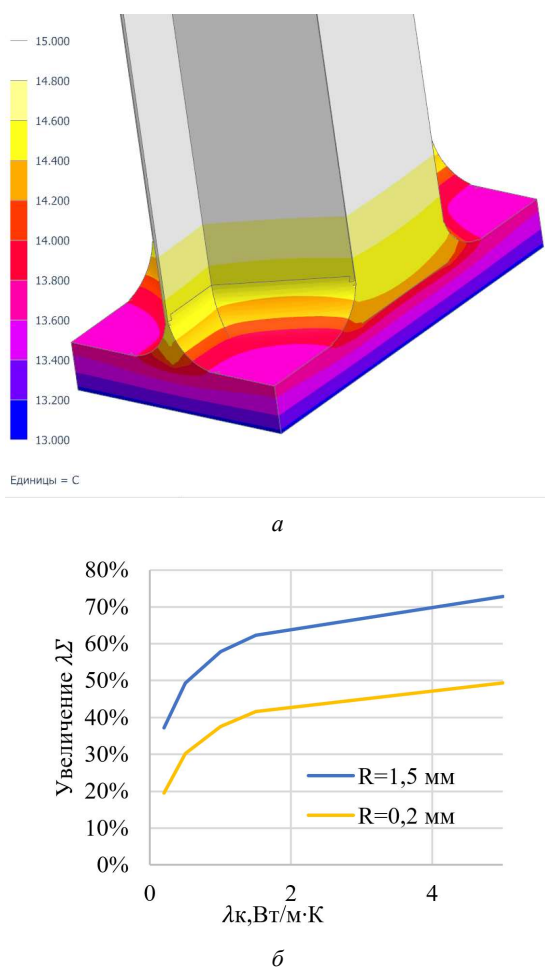


Рис. 9. Результаты расчета влияния клеевого слоя: а – эпюра температуры; б – зависимость λ_{Σ} при учете галтелей клеевой пленки

Как видно из рис. 9 а, даже галтели с небольшим радиусом и низкой теплопроводностью способствуют увеличению λ_{Σ} на 20 %. На рис. 9 б показано, что рост радиуса галтели и теплопроводности клея оказывает значительное влияние лишь при начальных значениях этих параметров. По мере их дальнейшего увеличения прирост теплопроводности становится менее выраженным и приближается к теоретическому максимуму λ_{C3} , обусловленному усиленной подачей тепла в алюминиевые соты.

3.4. Влияние воздушной среды

Учет воздушной среды в явном виде, несмотря на низкую теплопроводность, привел к увеличению λ_{Σ} до 11 %. На рис. 10 показана расчетная геометрия (рис. 10 а) с учетом клеевого слоя и анизотропии материалов, а также эпюра температуры (рис. 10 б).

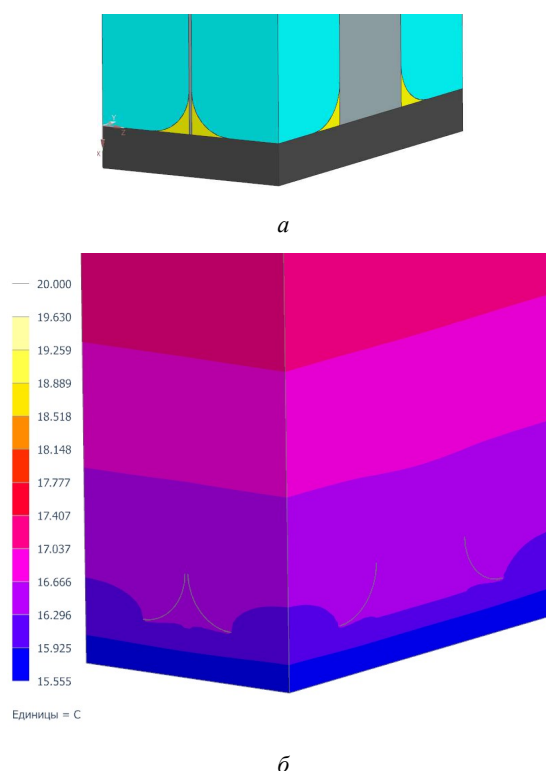


Рис. 10. Результаты расчета влияния воздушной среды: а – расчетная геометрия; б – эпюра температуры

Прирост теплопроводности λ_{Σ} до 11 % объясняется, тем, что, несмотря на низкую теплопроводность воздуха, площадь контакта значительна, передающими тепло поверхностями являются не только торцевые поверхности слоев 1 и 3, но и все поверхности сот. К примеру, используя метод электроанalogии, подразумевается одномерная передача тепла [17]. В формуле (3) не учитываются боковые перетекания тепла с воздухом, из-за чего вклад воздуха составляет около 1 %.

$$\lambda_{C3} = \frac{\lambda_H + \lambda_{\text{воз}} \times (C\bar{\rho} - 1)}{C\bar{\rho}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{воз}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; C – безразмерный геометрический параметр, $\bar{\rho}$ – средняя плотность сотового наполнителя.

4. Обсуждение результатов

Полученные результаты численного моделирования подтвердили, что теплопроводность трехслойной сотопанели существенно зависит от теплофизических характеристик и геометрии ее составляющих.

Изменение теплопроводности и толщины боковых слоев оказывает заметное влияние на эквивалентную теплопроводность центрального слоя. При повышении теплопроводности слоев 1 и 3 наблюдается стремление эквивалентной теплопроводности 2 слоя к теоретическому значению теплопроводности сот, что соответствует классическим теориям теплообмена в многослойных структурах. Однако при низкой теплопроводности боковых слоев тепловой поток в продольном направлении снижается, что увеличивает общее тепловое сопротивление панели.

Анизотропные свойства материалов боковых слоев, выраженные через параметр β , также влияют на эффективность теплопередачи. Рост продольной теплопроводности улучшает распределение температуры вдоль панели, но эффект насыщается при высоких значениях β .

Клеевой слой, даже при небольшом радиусе скругления галтелей и умеренной теплопроводности клея, образует дополнительный тепловой мост. Его вклад в общую теплопроводность наиболее заметен при низкой теплопроводности и толщине боковых слоев. При увеличении теплопроводности клея и размера галтели прирост теплопередачи уменьшается, приближаясь к предельным значениям, определяемым теплопроводностью сот.

Учет воздушной среды в межклеточном пространстве приводит к росту суммарной теплопроводности до 11 %. Это связано с тем, что, несмотря на низкую теплопроводность воздуха, площадь контакта и многopotочная передача тепла внутри сот обеспечивают значительный вклад. При этом моделирование воздушной среды в виде твердого тела является оправданным, так как направление градиента температуры подавляет развитие свободной конвекции.

В отличие от одномерных аналитических моделей, реальное поведение трехслойной сотовой панели носит выраженный трехмерный характер. Это приводит к необходимости применения трехмерного численного моделирования для точного определения ее теплопроводных свойств.

5. Заключение

В настоящей работе выполнено трехмерное численное моделирование процесса теплопередачи в трехслойной сотовой панели с учетом теплопроводности боковых слоев, влияния клеевого

соединения и окружающей воздушной среды. Установлено, что:

- при малых значениях теплопроводности боковых слоев (слои 1 и 3) теплопроводность центрального слоя (слоя 2) и, соответственно, суммарная теплопроводность трехслойной сотовой панели (λ_{Σ}) оказываются ниже теоретически возможных значений (1). Это объясняется ограниченной способностью боковых слоев 1 и 3 проводить тепло в продольном направлении, что снижает общий температурный градиент и эффективность теплообмена через соты;

- с увеличением теплопроводности боковых слоев 1 и 3 увеличивается теплопроводность сот λ_2 . При $\lambda_1 = \lambda_3 > 5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, рост λ_2 замедляется;

- анизотропные свойства боковых слоев 1 и 2 также влияют на распределение температуры: при более высокой продольной теплопроводности достигается улучшение распределения тепла, но общий прирост по сравнению с изотропным случаем ограничен;

- клеевой слой воздействует как дополнительный тепловой мост и вносит заметный вклад в величину λ_{Σ} ;

- наличие воздушной среды способствует увеличению суммарной теплопроводности до 11 %.

Проведенное исследование показало, что суммарная теплопроводность трехслойной сотовой панели λ_{Σ} оказывается ниже теоретически предсказанных значений при малых значениях $\lambda_1 = \lambda_3$. Это обусловлено тем, что реальная конструкция трехслойной сотовой панели представляет собой сложную трехмерную систему с анизотропными свойствами. В такой системе тепло передается во всех направлениях, что существенно влияет на распределение температурного поля и снижает эффективность теплообмена по сравнению с теоретическими направлениями (1).

Результаты численного исследования можно использовать при создании новых многослойных композитных структур с заданными теплофизическими свойствами.

Список источников

1. Prosuntsov P.V., Taraskin N.Y. Theoretical and numerical characterization of the thermal physical properties of carbon ceramic material // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. Vol. 72. DOI: 10.1051/mateconf/20167201092

2. Prosuntsov P.V., Taraskin N.Y. Theoretical and numerical characterization of the thermal conductivity of carbon ceramic material from realistic microscale imaging // *Matec Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2017. Vol. 92. DOI:10.1051/matecconf/20179201008
3. Gilmore D.G., Donabedian M. *Spacecraft thermal control handbook*. Vol. 1. El Segundo, CA: Aerospace Press, 2002.
4. Karam R.D. Satellite thermal control for systems engineers // *Aiaa*. 1998. Vol. 181.
5. Reznik S.V. et al. Modeling and identification of the processes of heat exchange in porous materials of thermal protection of reusable aerospace systems // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2004. Vol. 77. pp. 471–477, DOI: 10.1023/B:JOEP.0000036492.18328.f2
6. Рубцова Е.В., Шарова И.А., Петрова А.П. Высокопрочный пленочный клей ВК-36Т на основе эпоксидно-полисульфоновой системы // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. №. 6.
7. Комаров В.А. и др. Оптимизация трехслойных сотовых панелей пола из полимерных композиционных материалов пониженной горючести на основе высокопрочных углеродных и стеклянных волокон и клевого связующего // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2020. Т. 19. №. 3. С. 51–72. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-3-51-72
8. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // *Труды ВИАМ*. 2021. №. 9 (103). С. 33–42. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42
9. Аккуратов И.Л. и др. Результаты исследований свойств углепластиков на основе различных полимерных связующих, перспективных для изготовления конструкций космической техники // *Космическая техника и технологии*. 2018. №. 1 (20). С. 54–66.
10. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // *Авиационная промышленность*. 1997. №. 3–4. С. 58–60.
11. Wang Y. et al. Epoxy composites with high thermal conductivity by constructing three-dimensional carbon fiber/carbon/nickel networks using an electroplating method // *ACS omega*. 2021. Т. 6. №. 29. С. 19238–19251. DOI:10.1021/acsomega.1c02694
12. Tian T. Anisotropic thermal property measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials. For the Degree of Doctor of Philosophy – The University of Nebraska-Lincoln, 2011. pp. 179.
13. Барботько С.Л., Вольный О.С., Мараховский П.С. Исследование влияния схемы армирования на характеристики горючести углепластика // *Труды ВИАМ*. 2019. №. 10 (82). С. 103–110, DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-103-110
14. Sweeting R.D., Liu X.L. Measurement of thermal conductivity for fibre-reinforced composites // *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2004. Vol. 35. №. 7–8. pp. 933–938. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.01.008
15. Dasgupta A., Agarwal R.K. Orthotropic thermal conductivity of plain-weave fabric composites using a homogenization technique // *Journal of composite materials*. 1992. Vol. 26. №. 18. pp. 2736–2758. DOI: 10.1177/002199839202601806
16. Абелиов Я.Л. Наполнители для теплопроводящих клеев // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. №. 8. С. 26–27.
17. Тихий В.Г. и др. Определение эффективного коэффициента теплопроводности сотового заполнителя методом электротепловой аналогии // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2012. №. 2. С. 66–76.

References

- logy structures. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2018;(1 (20)):54–66. (In Russ.).
10. Molchanov BI, Gudimov MM. Properties of carbon fiber plastics and their applications. *Aviatsionnaya promyshlennost*. 1997;(3–4):58–60. (In Russ.).
 11. Wang Y et al. Epoxy composites with high thermal conductivity by constructing three-dimensional carbon fiber/carbon/nickel networks using an electroplating method. *ACS omega*. 2021;6(29):19238–19251. DOI: 10.1021/acsomega.1c02694
 12. Tian T. Anisotropic thermal property measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials. *For the Degree of Doctor of Philosophy – The University of Nebraska-Lincoln*. 2011. p. 179.
 13. Barbotsko SL, Vol'nyy OS, Marakhovskiy PS. Investigation of the effect of the reinforcement scheme on the flammability characteristics of carbon fiber. *Trudy VIAM*. 2019;(10 (82)):103–110. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-103-110
 14. Sweeting RD, Liu XL. Measurement of thermal conductivity for fibre-reinforced composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2004;35(7–8):933–938. DOI:10.1016/j.compositesa.2004.01.008
 15. Dasgupta A, Agarwal RK. Orthotropic thermal conductivity of plain-weave fabric composites using a homogenization technique. *Journal of composite materials*. 1992;26(18):2736–2758. DOI: 10.1177/002199839202601806
 16. Abeliyov YaL. Fillers for heat-conducting adhesives. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2005;(8):26–27. (In Russ.).
 17. Tikhii VG et al. Determination of the effective coefficient of thermal conductivity of a cellular filler by the method of electrothermal analogy. *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatel'nykh apparatov*. 2012;(2):66–76. (In Russ.).