
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.743.45:536.24

Ю. Н. Романенко, Е. Г. Афтандиянц, И. О. Шинский, О. А. Пеликан
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АРМИРОВАННЫХ ОТЛИВОК

Представлены методика и результаты численного моделирования изменения теплопроводности армированных отливок в зависимости от объемной доли армирующих элементов. Выполнен сравнительный анализ некоторых существующих аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать теплопроводность армированных материалов. Установлены границы использования этих зависимостей, а также точность получаемых результатов. Изложены принципы автоматизации расчета макроскопических теплофизических свойств армированных материалов.

Представлена методика і результати чисельного моделювання зміни теплопровідності армованих виливків залежно від об'ємної частки армуючих елементів. Виконано порівняльний аналіз деяких існуючих аналітичних залежностей, що дозволяють розраховувати теплопровідність армованих матеріалів. Встановлені межі застосовності цих залежностей, а також точність одержуваних результатів. Викладені принципи автоматизації розрахунку макроскопічних теплофізичних властивостей армованих матеріалів.

The technology and results of the numerical modeling of the heat conductivity changes in the reinforced castings depending on inclusion volume fraction of the reinforced elements were presented. The comparative analysis of some existing analytical dependencies allowing to calculate the heat conductivity of the reinforced materials was made. The application boundaries of these dependences were determined, as well as exactness of the obtained results. The principles of the automation of calculation of the macroscopic thermal physical properties of reinforced materials stated.

Ключевые слова: армирование отливок, моделирование, теплопроводность, зависимость.

При разработке технологического процесса изготовления армированных отливок на основе железоуглеродистых сплавов и керамических материалов необходимо детальное изучение влияния его параметров на полноту адгезионного взаимодействия армирующей и матричной фаз, а также на условия формирования отливки в целом. Такого рода экспериментальные исследования связаны с рядом трудностей. Одной из главных трудностей является отсутствие точного метода измерения температурного поля в объектах, размеры которых не превышают 50-100 мм, что связано с инерционностью термпар и их вкладом в теплообменные процессы. Помимо этого, ввиду своей дискретности, измеренные термопарами поля являются слишком грубыми для достоверного анализа протекающих процессов.

Получение адекватных данных по кинетике теплообмена при формировании армированных отливок возможно с применением численного моделирования на основе метода конечных элементов [1]. При этом расчетная точность значений температуры и дискретность температурного поля по сравнению с экспериментом повышается более чем на порядок. Этого вполне достаточно для монометаллических или биметаллических отливок [2]. Однако в большинстве случаев размеры армированных отливок многократно

(в 10-100 раз) превышают размеры армирующих элементов, что требует разбить системы "форма-отливка" на сотни тысяч и даже миллионы конечных элементов. Сокращения ресурсоемкости и длительности расчетов можно достичь при выполнении различного рода усреднений свойств армированного материала. Использование такого подхода наиболее эффективно в случае, когда распределение армирующих элементов имеет регулярный характер, а их размер существенно меньше размера отливки.

Следует отметить следующую особенность. Формирование армированных отливок в общем случае можно разбить на две стадии. На первой стадии, с момента образования контакта матричного расплава с армирующей фазой, между ними присутствуют значительные температурные градиенты. Теплообмен с формой на этой стадии по сравнению с теплообменом между компонентами отливки является незначительным и, поскольку протекание теплообменных процессов имеет локальный характер, исследование закономерностей взаимодействия армирующих элементов с матричным расплавом может проводиться для ограниченного малого объема, выбранного таким образом, чтобы тепловые потоки на его поверхностях отсутствовали [3]. Такой подход позволяет не рассматривать армированную отливку в целом и избежать усреднений, а также детально изучить взаимодействие отдельных армирующих элементов с матричным расплавом.

На второй стадии, после выравнивания температурного поля между компонентами отливки, определяющим становится теплообмен с формой. При этом затвердевание армированной отливки в целом может приниматься как затвердевание некоторого расплава, имеющего определенные эффективные макроскопические свойства.

Такие свойства армированных материалов можно рассчитать с использованием правила аддитивности, согласно которому теплоемкость (c_p^*) и плотность (ρ^*) будут равны

$$c_p^* = c_1 \cdot v_1 + c_2 \cdot v_2 ; \tag{1}$$

$$\rho^* = \rho_1 \cdot v_1 + \rho_2 \cdot v_2 ,$$

где c_1, c_2 - соответственно теплоемкости матрицы и армирующей фазы, Дж/(кг · °С); ρ_1, ρ_2 - плотности матрицы и армирующей фазы, кг/м³; v_1, v_2 - объемные доли матрицы и армирующей фазы.

В первом приближении такого рода формулы применимы и для расчета коэффициента теплопроводности (λ^*)

$$\lambda^* = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2 , \tag{2}$$

где λ_1, λ_2 - соответственно теплопроводности матрицы и армирующих элементов, Вт/(м · °С).

Эта формула полностью адекватна для армирования отливки непрерывными волокнами при анализе теплопроводности вдоль этих волокон. В то же время полученные по формуле (2) результаты могут быть весьма неточными, особенно в случае значительного различия теплопроводностей матрицы и армирующих элементов. Принцип аддитивности не учитывает также анизотропию теплофизических свойств при направленном расположении в отливке волокнистых или слоистых армирующих элементов.

Целью данного исследования являются выбор методов оценки (расчета) теплофизических свойств армированных материалов, а также определение рамок применимости этих методов. Получение точных данных по теплопроводности армированных материалов в зависимости от теплопроводностей компонентов и объемной доли армирующей фазы имеет для этого первостепенное значение. Наиболее быстрым, простым и точным методом для получения таких данных является метод численного моделирования теплообмена в трехмерной многосвязной области.

В качестве структуры армированного материала принимали плотную упаковку сферических армирующих элементов, пространство между которыми заполнено матричным сплавом. Такая структура соответствует максимальной объемной доле армирующих элементов - $\approx 74\%$. Для удобства расчета выбирали гранецентрированное плотно упакованное расположение шаров (рис. 1, а). Объемную долю армирующей фазы варьировали изменением радиуса армирующих элементов с одновременным сохранением расстояния между ними. Для создания наиболее экономной схемы расчета, соответствующей случаю отсутствия тепловых потоков на внешних поверхностях расчетной области, в выбранной

плотной упаковке выделен элементарный объем (рис. 1, б), границы которого являются плоскостями симметрии. Этот объем соответствует одной восьмой части кубической гранецентрированной ячейки, в которую попадают четыре одинаковые части соседних сферических частиц, центры которых образуют тетраэдр.

Из таких элементарных объемов составляли расчетную область (рис. 1, в). На боковых гранях области тепловые потоки принимали, равными нулю. На верхней и нижней гранях вводили граничные условия 1-го рода с различными температурами. Затем проводили расчет тепловых потоков через эту область до тех пор, пока не устанавливался стационарный теплообмен. По найденным тепловым потокам рассчитывали теплопроводность материала для различного объемного содержания армирующих элементов.

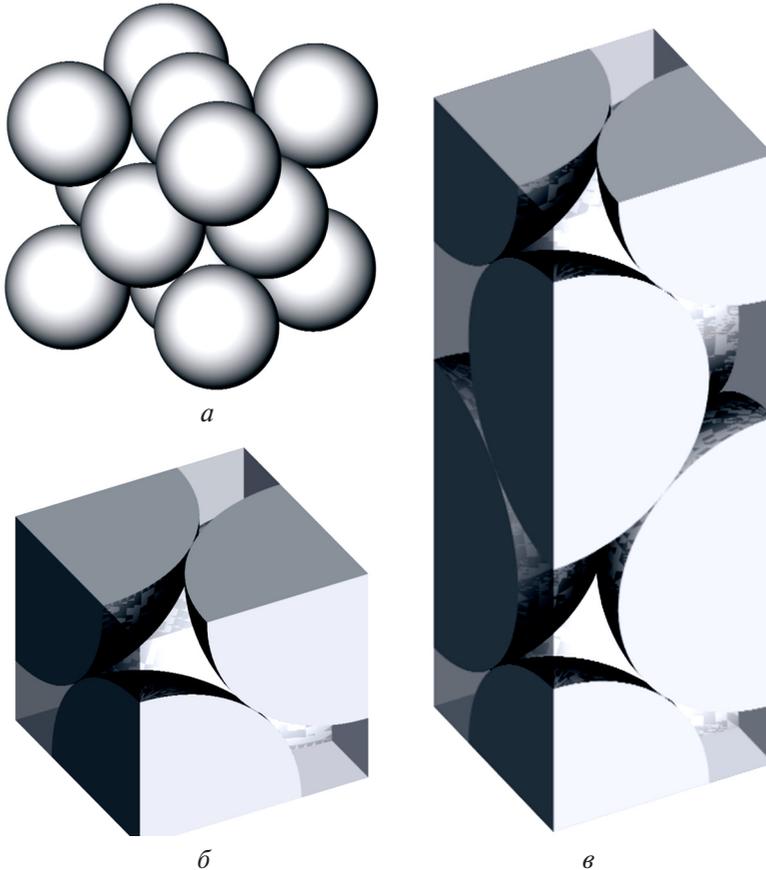


Рис. 1. Построение расчетной области для моделирования теплообмена армированного материала: а - расположение армирующих элементов; б - элементарный объем расчетной области; в - расчетная область

Для сравнения рассматривали два случая, в каждом в качестве матричного сплава принимали чугун марки 300Х12Г3М. В качестве материала армирующих элементов в первом случае принимали корунд, у которого теплопроводность значительно ниже, чем у матричного сплава, а во втором – сталь марки 30Л, теплопроводность которой выше, чем у чугуна марки 300Х12Г3М. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Для вычисления теплопроводности армированных материалов зернистой структуры Ван Фо Фы предложил формулу [4]

$$\lambda^* = \langle \lambda \rangle - v_1 \cdot v_2 \cdot \frac{\lambda_3^2}{3 \cdot \langle \lambda \rangle + (v_2 - v_1) \cdot \lambda_3} ; \quad (3)$$

$$\lambda_3 = \lambda_1 - \lambda_2 ; \quad (4)$$

$$\langle \lambda \rangle = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2. \tag{5}$$

Согласно работе [5], теплопроводность армированных материалов может рассчитываться по формуле

$$\lambda^* = \lambda_1 \cdot \frac{(A - 2 \cdot v_2 + 0,409 \cdot B \cdot v_2^{7/3} - 2,133 \cdot C \cdot v_2^{10/3})}{(A + v_2 + 0,409 \cdot B \cdot v_2^{7/3} - 0,906 \cdot C \cdot v_2^{10/3})}, \tag{6}$$

$$A = \frac{(2 + \lambda_d)}{(1 - \lambda_d)}; \quad B = \frac{(6 + 3 \cdot \lambda_d)}{(4 + 3 \cdot \lambda_d)}; \quad C = \frac{(3 - 3 \cdot \lambda_d)}{(4 + 3 \cdot \lambda_d)}; \quad \lambda_d = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

Расчеты теплопроводностей по формулам (2), (3) и (6) для двух принятых систем армированных отливок показывают (рис. 2), что формулы (3) и (6) наиболее близко описывают зависимость теплопроводности от объемной доли армирующей фазы. При этом точность формулы (6) несколько выше, особенно при значительном отличии теплопроводностей матричной и армирующей фаз. Однако, как видно из рисунка, эта формула непригодна для оценки теплопроводности материалов с объемной долей армирующей фазы более 70 %. Следует отметить, что формула (2) в случае, когда теплопроводности составляющих армированной отливки отличаются незначительно (приблизительно в 2 раза), дает результат с погрешностью не более 5%, а при различии на порядок погрешность достигает 30-40 %.

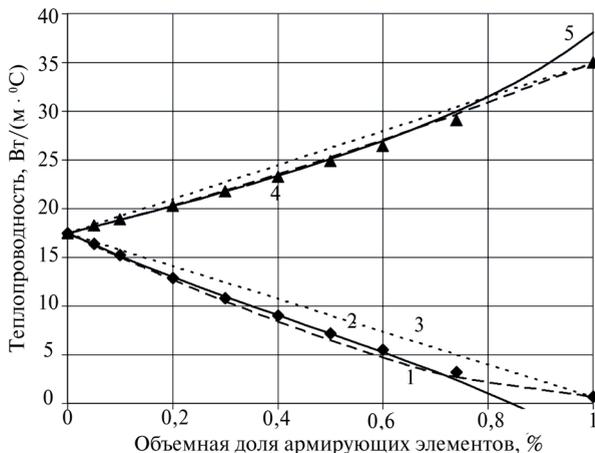


Рис. 2. Изменение теплопроводности армированного материала в зависимости от объемной доли армирующих элементов для систем "чугун 300X12ГЗМ-корунд" и "чугун 300X12ГЗМ-сталь 30Л": 1 - расчет по формуле (3); 2 - чугун 300X12ГЗМ - сталь 30Л; 3 - расчет по формуле (2); 4 - чугун 300X12ГЗМ - корунд; 5 - расчет по формуле (6)

Полученные результаты применимы также для рассмотрения теплопроводности сплавов в интервале их затвердевания. При этом армирующим элементам соответствует выделяющаяся твердая фаза, а матричному расплаву – жидкая.

Выводы

Численное моделирование теплообменных процессов в многосвязных объектах, какими являются армированные отливки, дает возможность получать точные данные по их макроскопическим теплофизическим свойствам, в частности, теплопроводности, с учетом анизотропии и упорядоченности этих систем, а также индивидуальных температурных зависимостей теплофизических свойств компонентов.

Полученные в результате моделирования макроскопические теплофизические свойства могут быть использованы для расчетов процессов теплообмена в армированных отливках на второй стадии их формирования (затвердевания), когда температуры матричного сплава и армирующих элементов выравниваются, что позволяет существенно ускорить расчет.

Для реализации автоматического расчета макроскопических теплофизических свойств с учетом изложенных особенностей можно использовать приведенные выше аналитические зависимости (2), (3) и (6). При этом также необходимо рассчитывать равновесную температуру конечных элементов, которая зависит от начальных температур компонентов, их теплоемкости и плотности. Автоматизация таких расчетов позволяет:

- моделировать теплообмен, непосредственно задавая расположение армирующих

элементов в отливке без предварительных исследований ее теплофизических свойств;

- на порядок повысить точность задания геометрии отливки, так как ее границы конечных элементов уже не должны совпадать с границами армирующих элементов.

Указанный подход дает возможность более точно описывать теплообмен при затвердевании расплавов, позволяя автоматически учитывать изменения их теплопроводности в процессе роста кристаллов твердой фазы.

Список литературы

1. *Поттер Д.* Вычислительные методы в физике. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
2. *Костенко Г. Д., Легенчук В. И., Бречко Е. Л., Романенко Ю. Н., Пеликан О. А.* Сравнительный анализ методов исследования теплофизических особенностей формирования слитков и отливок // Процессы литья. - 2006. - № 1. - С. 73-77.
3. *Костенко Г. Д., Романенко Ю. Н., Ширяев В. В., Пеликан О. А., Олейник В. Н. Костенко Д. Г.* Теплофизические параметры формирования композиционных отливок сталь (чугун) — твердый сплав // Там же. - 2005. - № 4. - С. 86-91.
4. *Ван Фо Фы Г.* Теория армированных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. - 230 с.
5. *Garrett K. W., Rosenberg H. M.* // J. Phys. D Appl. Phys. - 1974. - № 7. - P. -1247.

Поступила 10.07.2008

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 15 %

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

Справки

телефон: (044) 424-12-50

факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua