

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны  
«Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях  
поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре»,  
представленную к защите на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Чепак-Гизбрехт М.В. посвящена теоретическому исследованию влияния эффекта Соре на распределение компонентов в диффузионной зоне в условиях поверхностной термообработки.

**Актуальность исследования** связана с проблемами создания новых материалов и модификации уже существующих с целью придания им заданных свойств. Одним из направлений здесь является модификация поверхности с помощью различных методов обработки (лазерная, электронно-лучевая, плазменная, ионно-плазменная технологии). Указанные методы отличает локальность воздействия на вещество и минимальная длительность этого воздействия (нано – миллисекунды). В большинстве процессов энергетического воздействия на вещество определяющим параметром является температура и ее градиент. В связи с этим одним из наиболее важных факторов, влияющих на перераспределение компонентов в поверхностном слое, может оказаться диффузия под действием градиента температуры (эффект Соре). В литературе отмечается важность этого эффекта в технологиях обработки и модификации кристаллических материалов с помощью магнитных и электрических полей, а также потоков заряженных частиц. В связи с этим исследование влияния эффекта Соре на процессы переноса массы в условиях поверхностной термообработки материалов является актуальной задачей.

**Диссертационная работа** состоит из введения, трех глав и приложения. Объем диссертации 150 страниц, 59 рисунков, 6 таблиц. Во введении обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, приводится краткое содержание работы, характеризуются ее новизна и научная значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 вводятся основные параметры, характеризующие эффект Соре в жидких и газовых смесях, проводится обзор литературы по теме диссертации. В главе 2 приводится общая постановка задачи о переносе тепла и массы в условиях поверхностной термообработки деформируемых тел с учетом эффекта Соре. Описаны методы исследования. Для решения поставленных задач применяется метод интегрального преобразования Лапласа, а также численное интегрирование. Для оценки напряжений и деформаций в диффузионной зоне используются линейные модели упругих или вязкоупругих тел. Глава 3 посвящена решению задачи о перераспределении легирующего элемента при поверхностном нагреве электронным лучом образца с покрытием. В главе 4 решена задача о перераспределении примеси, внедряемой в материал в процессе имплантации. Влияние термодиффузии на перенос компонентов при электроконтактном спекании исследуется в главе 5, а при соединении разнородных материалов

диффузионной сваркой – в главе 6. В работе найдены аналитические (точные) решения задач, построены и проанализированы профили температуры и концентрации компонентов в зависимости от времени и интенсивности воздействия. Представляет интерес выводы о том, что эффект Соре может приводить к оттоку легирующих элементов покрытия с его поверхности, а также способствовать ускорению диффузионных процессов и образованию контактов между соединяемыми материалами.

**Научная новизна работы** связана с тем, что впервые было проведено систематическое исследование влияния эффекта Соре на диффузионные процессы в условиях локального нестационарного нагрева, а также на напряжения и деформации для упругого и вязкоупругого материалов. Достоверность результатов определяется использованием апробированных моделей и методов решения.

**По содержанию работы следует сделать следующие замечания:**

1. Условие равенства диффузионных потоков на границе различных сред на страницах 44, 49, 94, 97, 105, 106, 110 записано некорректно. Левая и правая части этого равенства должны умножаться на плотности соответствующих сред, см. формулу (2.1). Рассматриваемые в работе среды имеют существенно различные плотности (см. таблицу 3.1), поэтому учет корректного граничного условия может привести к количественному и качественному изменению рассчитанных профилей концентраций в Главах 3, 5, 6.

2. В пункте 3.3 проводится сравнение аналитического и численного решения задачи тепломассопереноса с учетом эффекта Соре в случае диффузии двух компонент из покрытия в подложку. Указано, что решения согласуются с «допустимой точностью (относительная погрешность находится в пределах 10–15 %)». Такая погрешность является слишком большой. По-видимому, она связана с некорректным расчетом по аналитическим формулам (например, взято недостаточно членов ряда) или неправильной работой численной схемы. Для рассматриваемых относительно простых задач точное и численное решение должны практически совпадать.

3. В пункте 4.5 исследуется влияние неравномерностей температуры и концентрации на напряжения и деформации в среде. Утверждается, что с ростом вязкости деформации увеличиваются, а напряжения уменьшаются, при этом при стремлении вязкости к бесконечности мы приходим к результатам для упругой модели. Вообще говоря, при заданном тепловом воздействии упругая модель должна приводить к меньшим деформациям и большим напряжениям по сравнению с вязкоупругой моделью, т.е. с ростом вязкости деформации должны уменьшаться, а напряжения увеличиваться, а с уменьшением вязкости – наоборот. Например, подставляя  $\mu_v$  из (2.36) вместо  $\mu$  в (2.21) и устремляя вязкость  $\eta$  к нулю, найдем, что напряжение  $\sigma^E$  будет стремиться к нулю.

4. В работе предполагается, что теплофизические свойства сред (плотность, теплопроводность, теплоемкость) являются постоянными. В то же время, расчеты показывают наличие существенных перепадов температуры в средах (несколько сотен градусов). В этом случае может оказаться существенной зависимость коэффициентов от температуры. К сожалению, в работе не приводятся оценка

характерных изменений свойств с изменением температуры и возможного влияния этих эффектов на перенос тепла и массы.

5. На стр. 16 указано, что «термодиффузия в жидкостях происходит на порядок быстрее, чем в газах». Это утверждение неправильно. Время установления стационарного состояния пропорционально квадрату характерного размера и обратно пропорционально коэффициенту диффузии. В газах коэффициент диффузии имеет порядок  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, а в жидкостях –  $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Поэтому в газах термодиффузия происходит в  $10^4$  раз быстрее, чем в жидкостях.

6. На стр. 5–6 приводится утверждение «Теоретические оценки термодиффузионной постоянной и термодиффузионного соотношения основаны на моделях термодиффузионной ячейки и термодиффузионной колонны ...». На самом деле, данные модели используются для экспериментального определения указанных параметров на основе измеряемых величин.

7. На стр. 13 дается обзор источников [16, 17, 21, 22], при этом указано, что в цифровой интерферометрии изменение концентрации в растворе соотносят с изменением коэффициента поглощения среды. На самом деле, изменение концентрации определяют по изменению показателя преломления лазерного луча.

8. На стр. 23 сказано, что «проблема появления отрицательных решений в диффузионных или термодиффузионных задачах до сих пор не решена». Нет такой проблемы, есть просто некорректный (неправильный) расчет. Для чисто диффузионных задач (без конвекции) имеется целый ряд аналитических и численных методов, которые позволяют получить решение с требуемой точностью.

9. На стр. 34 (формула (2.12)) вводятся два коэффициента концентрационного расширения для системы из двух компонент. Так как в этом случае имеется лишь одна независимая концентрация, то и коэффициент должен быть один.

10. В целом, вывод аналитических формул для решений (определение констант, приведение подобных членов и т.д.) в диссертации излагается слишком подробно. Многие моменты следовало бы опустить, ввести специальные обозначения, тем самым сократив количество формул и улучшив их восприятие.

11. Имеются ошибки в формулах. В определениях термодиффузионной постоянной и термодиффузионного отношения на стр. 12 пропущена температура в знаменателе. На стр. 33 указано, что формулы (2.9) и (2.10) имеют одинаковый вид, хотя это не так. На стр. 80 говорится о величине  $\alpha$ , которой нет в описываемых формулах. Кроме этого, имеется ряд опечаток на стр. 5 (строки 6 и 9 снизу), 11 (перед формулой), в некоторых случаях пропущены знаки препинания (стр. 14, 3 строка снизу). На стр. 26 не дано определение величин  $\epsilon_{kk}$ , которые в этом месте вводятся впервые.

Высказанные замечания не носят критического характера для работы. В целом, общая оценка работы является положительной.

**Результаты диссертации опубликованы** в 20 печатных работах, из них 5 статей в журналах из списка ВАК (Известия высших учебных заведений: Физика), 6 статей в зарубежных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus (в основном материалы конференций). Можно выразить некоторое сожаление, что

отсутствуют статьи в так называемых «классических» журналах, например, Прикладная механика и техническая физика, Известия РАН: Механика твердого тела, International Journal of Heat and Mass Transfer.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

В целом, диссертация Чепак-Гизбрехт является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решен ряд задач о перераспределении компонент под действием эффекта Соре в условиях поверхностного энергетического воздействия. Полученные теоретические результаты имеют существенное значение для материаловедения и могут быть использованы для качественного анализа вклада термодиффузионного эффекта в процесс перераспределения компонентов при поверхностной термообработке.

Считаю, что диссертационная работа Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям (раздел II «Положения о присуждении ученых степеней»), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

Рыжков Илья Игоревич

Ведущий научный сотрудник,  
Доктор физико-математических наук  
(01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы)

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Обособленное подразделение – Институт вычислительного моделирования СО РАН

Адрес: Академгородок 50 стр. 44

660036 г. Красноярск

отдел вычислительной физики

Тел. +7 391 2907528, E-mail: [rji@icm.krasn.ru](mailto:rji@icm.krasn.ru)

Я, Рыжков Илья Игоревич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Рыжкова И.И. заверяю  
Ученый секретарь ИВМ СО РАН, к.ф.м.н.



Вяткин А.В.

19.05.2017