

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
Российской академии наук**



125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1
тел. (495)946-18-06, 946-18-02; факс: (495)946-18-03
e-mail: iam@iam.ras.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПРИМ РАН

д-р техн. наук

А.Н. Власов

«23» мая 2017 г.



В диссертационный совет Д 212.267.13,
при Национальном исследовательском
томском государственном университете

634050, г. Томск, пр. Ленина 36.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института прикладной механики Российской академии наук
на диссертационную работу Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны
«Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях поверхностной
термообработки с учетом эффекта Сорэ», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

На отзыв представлены: текст диссертационной работы на 150 стр., включая 59 иллюстраций и 6 таблиц, библиографический список из 184 наименований, автореферат на 25 стр., включая список из 20 публикаций по теме диссертации (5 статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК РФ). Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой списка использованных источников и литературы.

Актуальность темы диссертации

Для получения материалов и конструкций нового поколения используют высокотехнологические методы обработки, в том числе электронно-лучевые и пучково-плазменные технологии модификации материалов, электроимпульсные и другие. Материалы и изделия, полученные в таких условиях, имеют повышенные физико-механические характеристики в сравнении с традиционными методами обработки. Процессы, протекающие в ходе высокотехнологической обработки, являются неравновесными, связанными и характеризуются многостадийностью и разными пространственно-временными масштабами. Например, градиент

температуры, возникающий в поверхностном слое обрабатываемого материала, приводит не только к появлению температурных напряжений, но и способствует притоку примесей или легирующих элементов к поверхности, создавая градиентную структуру материала. Ввиду комплекса взаимосвязанных явлений, протекающих на разных стадиях процессов обработки, экспериментальные исследования физико-механических явлений затруднено. Комплексное и детальное теоретическое исследование, позволяющее понять физику протекающих процессов, возможно с использованием математического моделирования. Так как диффузия, теплопроводность и деформирование характеризуются разными временными и пространственными масштабами, отличающимися на порядки, для сокращения времени счета при численном исследовании задач требуется разработка специальных алгоритмов. В связи с этим необходимы точные и приближенные аналитические решения, позволяющие оценить вклад эффекта (в данном случае эффекта Core) с целью учета или исключения ввиду малости при численном счете, а также верифицировать решения, полученные численно в частных ситуациях. Поэтому, диссертационная работа Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны, посвященная математическому моделированию перераспределения элементов в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Core, является актуальной. Тема диссертационного исследования соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации №2 «Индустрия наносистем» и критическим технологиям Российской Федерации № 17 «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов», № 24 «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения», утвержденным Указом Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 150 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников и литературы, включающего 184 наименований. Материал содержит 59 иллюстраций и 6 таблиц.

В первой главе выполнен краткий анализ литературных данных по исследованию термодиффузии. Перечислены методы измерения и теоретические модели (в том числе модели механики сплошной среды), на основе которых

определяются параметры, характеризующие проявление эффекта. Приведены величины некоторых параметров для смесей газов и конденсированных веществ, имеющиеся в литературе, отраженной в обзоре исследований по теме диссертации. Обзор основан на анализе значительного количества отечественных и зарубежных публикаций.

Во второй главе приведена общая постановка проблемы исследования эффекта Соре в деформируемых телах в условиях поверхностной термообработки и описаны методы исследования (операционный метод, асимптотические разложения в пространстве изображения по малым параметрам, метод аналогий между упругими и вязкоупругими напряжениями и деформациями в пространстве изображений). Показано, какие упрощения приводят к линеаризованным формулировкам теплодиффузионных задач. Задачи сформулированы в одномерной постановке с учетом ряда допущений: теплофизические и механические свойства материалов постоянны в исследуемом интервале температур и концентраций, фазовые и химические превращения отсутствуют, перенос тепла под действием градиента концентраций отсутствует. Данные допущения справедливы применительно к исследуемым процессам в указанных условиях и не оказывают значительного влияния на качественный результат. Кратко сформулированы задачи о равновесии для однослойной и двухслойной полосах с термодиффузией для упругого материала, указывается на возможность использования вязкоупругой аналогии для рассмотрения подобных задач и для вязкоупругих материалов.

В главах 3–6 сформулированы и решены частные задачи, относящиеся к исследованию процессов в диффузионной зоне в разных технологиях: перераспределение легирующих элементов в условиях нагрева материала с покрытием электронным лучом; перераспределение примеси в условиях имплантации; термодиффузия при электроконтактном спекании, в том числе с учетом не идеальности контакта; термодиффузия в зоне соединения, получаемого в процессе диффузионной пайки с использованием электронно-лучевого нагрева. Выявлено, что аналитические решения содержат безразмерные комплексы, которые характеризуют степень влияния эффекта Соре на перераспределение концентрации. Отражено влияние термодиффузии на массоперенос в диффузионной зоне. Продемонстрировано влияние эффекта Соре на величину

упругих и вязкоупругих напряжений в имплантированной пластине и пластине с покрытием, нагреваемой электронным лучом. В конце каждой главы сформулированы выводы.

В заключении содержатся основные выводы, полученные в рамках выполнения диссертационной работы. Приведенные в заключении выводы обоснованы. В целом диссертация представляет собой оригинальное завершённое исследование с логической взаимосвязью между разделами. Содержание диссертации полностью отражено в автореферате. Автор продемонстрировал научную квалификацию, способности к анализу литературных данных, к постановке связанных термомеханических проблем, имеющих прямое отношение к современным технологическим процессам. Автор, продемонстрировала способности связанные не только с построением эффективных и удобных для анализа решений, но также и способности к достаточно глубокому анализу полученных результатов, их грамотному описанию и физической трактовке, к формулировке логичных выводов.

Научная новизна

К наиболее существенным и оригинальным следует отнести следующие результаты:

1. Сформулированы частные задачи о перераспределении диффузанта с учетом эффекта Сорэ в условиях нестационарного нагрева для ряда технологических процессов, в которых вклад эффекта Сорэ может оказаться существенным.

2. Построены аналитические решения сформулированных задач. Проведен анализ аналитических решений, на основе которого выявлены безразмерные комплексы параметров, характеризующих вклад эффекта Сорэ в перераспределение диффузанта в зависимости от условий нестационарного нагрева и теплофизических свойств обрабатываемых материалов.

3. Изучено влияние соотношения теплофизических и диффузионных свойств на характер распределения легирующих элементов в матрице и в соединении материалов в условиях термообработки. Показано, что эффект Сорэ приводит к появлению градиента концентраций в диффузионной зоне, ускоряет перенос активного компонента из зоны соединения вглубь соединяемых материалов.

4. Дана оценка механических напряжений, возникающих в диффузионной зоне. Продемонстрировано, что термодиффузия приводит к появлению экстремумов в распределении напряжений, эти напряжения локализованы в диффузионной зоне, а их значение на порядок превышает температурные напряжения. Выявлено, что увеличение коэффициента термодиффузии приводит к увеличению напряжений и уменьшению деформаций по абсолютной величине. Впервые показано, что учет вязкости материалов при расчете напряжений и деформаций существенен только на начальной стадии нагрева, не превышающей несколько миллисекунд.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены новые аналитические решения частных задач, которые могут быть использованы для качественной оценки вклада эффекта Соре в условиях нестационарной термообработки. Решения могут быть использованы для оценки корректности частных вариантов численных решений более сложных моделей, учитывающих взаимозависимость полей температуры, концентрации и напряжений.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и заключений диссертации

Полученные результаты можно считать достоверными, поскольку моделирование выполнено на основе соотношений, согласованных с термодинамикой необратимых процессов; сформулированные задачи и принятые допущения как с формальной точки зрения, так и точки зрения с физического смысла соответствуют условиям, реализующимся в диффузионной зоне материалов, подвергающихся нестационарному нагреву в ходе исследуемых технологических процессов; полученные решения линейных или линеаризованных уравнений найдены с помощью математически строгих методов интегральных преобразований Лапласа и асимптотических разложений, согласуются с известными аналитическими решениями (без учета эффекта Соре), не противоречат решениям, полученным численно (с учетом зависимости коэффициента диффузии от температуры).

Результаты и положения, выносимые на защиту, являются научно обоснованными, непротиворечивыми, подтверждены на высоком теоретическом уровне.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по области исследования «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах» (п. 1 паспорта специальности).

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в диссертации результаты могут найти применение при исследовании влияния эффекта Соре на массоперенос в кристаллических материалах в условиях нестационарного нагрева, как основа для комплексных исследований процессов, происходящих в диффузионной зоне в условиях высокотехнологической обработки.

Результаты исследований могут применяться в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Национальном исследовательском Томском государственном университете, Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) и других исследовательских центрах, работающих в области создания и исследования свойств модифицированных и многослойных материалов

Замечания и вопросы

По диссертации, ее оформлению и содержанию возникли следующие замечания и вопросы:

1. Основные результаты работы связаны с изучением теплофизических и диффузионных свойств процессов термообработки на характер распределения легирующих элементов в матрице и в соединении материалов, с оценкой

механических напряжений, возникающих в диффузионных зонах. Эти результаты в первую очередь имеют отношение к технологиям, в которых для конденсированных материалов эффект Соре используется непосредственно. В тексте диссертации указывается, что эффект Соре и его влияние на процесс является существенным, однако фактически именно этот момент не вполне обоснован в силу отсутствия конкретных литературных данных по поводу качественных исследований применительно к кристаллическим материалам.

2. По-разному обозначена тема диссертации в тексте на стр. 5, четвертый абзац сверху («Моделирование перераспределения элементов в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре») и на титульном листе («Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре»).

3. На стр. 12, третий абзац снизу, формула для термодиффузионного соотношения приводится с ошибкой и противоречит определению термодиффузионной постоянной. Одна и та же физическая величина – поток тепла – в разных местах обозначается по-разному (на стр. 26, третий абзац сверху, в формуле (2.1) и далее).

4. В разделе 2.3.1, где приводятся основные положения применяемого в диссертации аналитического метода, первая теорема о разложении (стр. 29, шестой абзац снизу) приводится с ошибкой, см. для сравнения формулы (29.1) и (29.2) на стр. 164 справочного пособия [Дёч Г. *Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования*. М., Наука, 1971]. Второе, используемое в диссертации как математический инструмент разложение, оформлено как «следствие второй теоремы» (стр. 29, четвертый абзац сверху), которая нигде не обозначена и ссылка на которую не приводится.

5. Решения, полученные в разделах 3-6, не вполне корректно называть точными аналитическими решениями (стр. 56, второй абзац снизу). Все они получены аналитическим методом (методом интегрального преобразования Лапласа), однако представлены, как правило, в виде бесконечных рядов по экспонентам и по функциям ошибок (*erfc*) от сложного аргумента. Такие представления, чтобы иметь право быть «...точным аналитическим решением», требуют отдельного тщательного исследования аналитических свойств

полученных бесконечных рядов, и в частности, обоснования условий и областей их сходимости

6. В разделах главы 2, где приводятся постановки задач о термодиффузии в однослойной и двухслойной полосе не совсем корректно говорить о пластинах. Более того, используется термин тонкие пластины. Более корректно говорить о полосе. Некорректно говорить и о тонких пластинах, ибо ограничений на толщину при постановке не возникает. Здесь же в качестве рекомендации отметим, что объем диссертации мог быть без ущерба для содержания диссертации значительно уменьшен за счет главы 2, текст которой содержит известные факты и по стилю напоминает пособие для студентов.

7. В диссертации представлено большое количество промежуточных аналитических выкладок, которые являются громоздкими и, по сути, представляют собой результат использования систем символьного вычисления. Приведение таких формул, в принципе, не обязательно, ибо их аналитический вид в силу громоздкости не представляет интерес для непосредственного анализа, а используется для получения численных результатов.

8. На стр. 103, рис. 5.3. В предшествующем тексте отмечается, что «В случае, когда контакт неидеальный, разность температур в зоне контакта с течением времени растет. При этом, зона прогрева в более нагретом материале сохраняется, в то время как в менее нагретом материале зона прогрева уменьшается относительно температуры, рассчитанной для идеального теплового контакта». Во-первых, это утверждение, не совсем корректно с точки зрения формулировки («зона уменьшается относительно температуры»). Во-вторых, из сопоставления рисунков 5.3а и 5.3б следует, что зона прогрева фактически неизменна, так же как и температура охлажденной области ("справа от $x=0$ "), по сравнению с расчетом для идеального контакта. Однако, повышается температура более нагретой области ("слева от $x=0$ "). На графиках используются разные масштабы. Желательно дать объяснение данного эффекта роста температуры в нагретой области при фактически прежней степени прогреваемости правой области.

9. Найденный уровень напряжений в 15–25 ГПа (выше теоретической прочности металлов!), вызванных диффузией, является нереальным и требует

объяснения (см., например, рисунки 3.14, 3.15). Данный результат, по-видимому, получен из-за использования не вполне подходящего выбора значений констант модели, определяющих термодиффузионные эффекты.

10. На стр. 33 не совсем корректно указано «Компоненты тензора напряжений связаны с деформациями и/или скоростями, температурой и составом», следует писать «Компоненты тензора напряжений связаны с деформациями и/или скоростями деформаций, температурой и составом».

Сформулированные замечания и возникшие вопросы не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы, ее научной и практической значимости, не влияют на обоснованность защищаемых положений.

Заключение

В целом диссертация Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны «Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Сорэ» является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему и содержит аналитические решения частных задач, применимых для описания физических явлений, происходящих в диффузионной зоне в ходе высокотехнологических процессов термообработки. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. В автореферате и публикациях верно отражены основные результаты работы. Заключение и рекомендации работы обоснованы.

Результаты диссертации Чепак-Гизбрехт М.В. прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. По их результатам опубликованы 20 работ: 5 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 6 статей в зарубежных электронных научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, 1 статья в зарубежном научном журнале, 1 статья в сборнике трудов, 7 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям пунктом 9 Положения о присуждении научных степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред.

от 02.08.2016), а ее автор, Чепак-Гизбрехт Мария Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв о диссертации М.В. Чепак-Гизбрехт составлен доктором физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела) Беловым Петром Анатольевичем и кандидатом физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела) Волковым-Богородским Дмитрием Борисовичем. Отзыв обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории «Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций» Института прикладной механики РАН (протокол № 3 от 14.04.2017) с участием докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Ведущий научный сотрудник института прикладной механики РАН,

Доктор физико-математических наук

Белов Петр Анатольевич

Лаборатория «Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций»

Ведущий научный сотрудник института прикладной механики РАН,

кандидат физико-математических наук

Волков-Богородский Дмитрий Борисович

Лаборатория «Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций»

Подписи д.ф.-м.н. Белова П.А. и к.ф.-м.н. Волкова-Богородского Д.Б. подтверждаю,

ученый секретарь ИПРИМ РАН, кандидат физико-математических наук



Ю.Н.Карнет