

## ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОДУКТАХ СИНТЕЗА ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ДЛЯ СМЕСИ Ni–Al\*

Н.В. Букрина, А.Г. Князева

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

В работе предложен способ оценки напряжений и деформаций в процессе синтеза интерметаллида в режиме теплового взрыва порошковой смеси Ni–Al в цилиндрическом реакторе. Задача сводится к описанной в литературе задаче о напряженно-деформированном состоянии цилиндра с покрытием. Для оценки напряжений в образце в первом приближении используются известные задачи термоупругости, в том числе имеющие аналитические решения. Каждый расчет дает полную информацию о распределении концентраций элементов соединений и фаз, а также о формировании напряжений и деформаций в различных слоях образца.

**Ключевые слова:** высокотемпературный синтез, термические и концентрационные напряжения, интерметаллид, математическое моделирование.

### Введение

Напряжения и деформации, сопровождающие химические превращения или фазовые переходы в твердом теле, возникают в результате неоднородности температурного поля и различия свойств веществ, т.е. могут иметь разную физическую природу [1, 2]. Разделить их четко как экспериментально, так и теоретически не представляется возможным, поскольку разные физические явления взаимосвязаны [3]. Оценка сопутствующих и остаточных напряжений важна в различных современных технологиях, включая разные технологии нанесения покрытий [4], создание материалов и изделий в аддитивных технологиях [5], соединение разнородных материалов [6, 7]. Однако, если технологические процессы сопровождаются химическими реакциями, фазовыми переходами и изменением структуры, напряженно-деформированное состояние необходимо анализировать с учетом вкладов разных физико-химических явлений.

Для расчета полей напряжений, возникающих вследствие наличия высоких температурных градиентов в процессе синтеза, можно воспользоваться простыми приближениями, учитывающими характер полей температуры и концентраций в поля напряжений и деформаций [8]. Изменение концентрации компонентов, приводящее к соответствующему объемному изменению, связано с концентрационно-диффузионными напряжениями и деформациями, аналогичными температурным [9–11]. Такой подход позволяет получить представление об эволюции средних напряжений в процессе синтеза материала и оценить остаточные термические напряжения в конечном продукте. Например, в [12] представлена модель для расчета остаточных напряжений в окрестности границы раздела «покрытие – подложка» вследствие изменения не только температуры, но и фазового состава. Установлено, что для данных условий модификации поверхности причиной напряжений преимущественно является изменение состава вследствие диффузии и химических реакций. Примером связанной модели, в которой учитываются как термические, так и химические напряжения, может быть работа [13].

Цель настоящей работы состоит в оценке напряжений и деформаций, сопутствующих процессу синтеза материала в режиме теплового взрыва.

### Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи о формировании композита из порошковой смеси чистых элементов Ni и Al в режиме динамического теплового взрыва при нагреве порошковой прессовки в цилиндрическом реакторе индукционным источником теплоты сводится к решению уравнения теплопроводности в различных областях (реакционной смеси и стенок реактора) и системы уравнений химической кинетики. Детально термокинетическая постановка задачи описана в работе [14] и соответствует синтезу композита в объеме цилиндрического реактора с толстыми стенками.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>