

УДК 536.46+54.05

DOI: 10.17223/00213411/62/8/175

А.Г. КНЯЗЕВА<sup>1,2</sup>, Н. ТРАВИЦКИЙ<sup>3</sup>**ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕМНОГО СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ \***

Проанализированы закономерности объемного синтеза композита в цилиндрическом реакторе с учетом основных управляющих параметров. Учитывается распределение температуры по объему реактора, различие свойств реагента и реактора, а также две суммарные стадии, первая из которых соответствует синтезу оксидных включений и является экзотермической, вторая суммарная стадия соответствует формированию матрицы. Показано, что для разных частных вариантов управления процессом нагрева возможна реализация почти адиабатических условий, классический тепловой взрыв в условиях теплообмена с окружающей средой, динамическое инициирование реакции при разных скоростях нагрева и режим синтеза при понижении температуры с формированием неравновесного состава. Все названные режимы реализуются в экспериментальных условиях.

**Ключевые слова:** синтез композитов, двухстадийная кинетика, термофизические закономерности.

**Введение**

Некоторые чистые металлы и многие сплавы могут быть получены при использовании металлотермических реакций [1]. Среди металлотермических процессов ведущее место занимает алюминотермия – восстановление металлов из оксидов алюминием. Подобные процессы могут быть использованы для получения композитов с упрочняющими оксидными включениями. В этом случае тепловыделение вследствие реакции восстановления может способствовать синтезу в режиме теплового взрыва или послыйного горения, а разбавление смеси конечным продуктом синтеза наряду со скоростью внешнего нагрева может использоваться как управляющий фактор. Например, в [2] композиты с оксидными включениями были получены из смесей порошков  $TiO_2-Al$  и  $TiO_2-Al-C$ . В первом случае титан восстанавливается расплавом  $Al$  из оксида  $TiO_2$  с образованием  $Al_2O_3$ , а затем далее вступает в реакцию с оставшимся алюминием. Во втором случае титан может взаимодействовать с углеродом с образованием карбида, а затем – тройного соединения. Подобный композит с матрицей из смеси  $TiAl$  и  $Ti_2AlC$  получен и в [3] в режиме горения. В работах [4, 5] композитные порошки  $Al_2O_3-TiC$  были синтезированы в режиме горения из смеси тех же порошков, причем при низком содержании углерода реакции завершались не полностью. Более сложные смеси для получения композитов использованы в [6]. Многофазный продукт содержит в разных пропорциях интерметаллиды  $TiAl_x$ ,  $FeAl_x$  и  $Ti_2Fe$ . При увеличении температуры синтеза некоторые из фаз могут разлагаться; остаются устойчивые соединения  $TiC$ ,  $Al_2O_3$  в матрице на основе железа. Композиты на основе титана, упрочненные равномерно распределенными частицами  $Al_2O_3$  и  $TiB_2$ , получены в [7].

В процессе горения смеси  $Ni + Al + xCr_2O_3$  происходит формирование многофазного продукта, содержащего основные фазы  $NiAl$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr$  и остаточное количество свободного никеля [8]. Композит с включениями оксида алюминия в интерметаллидной матрице с взаимопроникающими фазами  $TiAl-Ti_3Al$  синтезирован в [9]. Плотные композиты с матрицей на основе  $Fe-Cr-Ni$ , упрочненной оксидными включениями, были получены в [10] с приложением внешнего давления. Металлотермические реакции были использованы для получения плотных композитов со взаимопроникающими фазами  $Al_2O_3$  и алюминидов  $Ti$ ,  $Fe$ ,  $Nb$  [11, 12]. Представленные примеры и описанные в публикациях результаты исследования материалов говорят о возможности управления составом и структурой продуктов за счет выбора подходящих условий синтеза, что, в конечном счете, и определяет механические и прочностные свойства [13, 14].

Цель настоящей работы состоит в установлении термокинетических особенностей объемного синтеза многофазного композита в реакторе при наличии двух химических стадий.

**Постановка задачи**

Рассматриваем цилиндрический реактор (рис. 1), в котором находится смесь порошков  $I$ , способных к химическому реагированию. Нагрев смеси может осуществляться через стенки реак-

\* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН на 2017–2020 гг., проект № 23.2.3.

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>