

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

PACSnumbers: 61.72.Cc, 64.70.kd, 66.30.Ny, 66.30.Pa, 68.65.Ac, 81.16.Be, 81.20.Ka, 82.33.Vx

### Подход обратной задачи для прогнозирования характеристик самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в многослойных фольгах с учётом конкурентного фазообразования

Т. В. Запорожец, Я. Д. Король

*Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого,  
бульв. Шевченко, 81,  
18031 Черкассы, Украина*

Предложено полуаналитическое решение обратной задачи многостадийной СВС-реакции для определения термодинамической движущей силы и параметров реакционной диффузии в многослойной фольге с наноразмерным периодом слоёв. Метод основан на измерении температуры и скорости фронта СВС-реакции в зависимости от времени изотермического отжига. Предложены аналитические формулы для оценки температуры и скорости фронта двухстадийной СВС-реакции с учётом старения фольги.

**Ключевые слова:** реакционная диффузия, фазообразование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), параболический закон роста, интерметаллиды, многослойная фольга.

Запропоновано напіваналітичний розв'язок оберненої задачі багатостадійної СВС-реакції для визначення термодинамічної рушійної сили і параметрів реакційної дифузії у багатошаровій фолії з нанорозмірним періодом прошарків. Метод ґрунтується на мірянні температури та швидкості фронту СВС-реакції в залежності від часу ізотермічного відпалу. Запропоновано аналітичні формули для оцінювання температури та швидкості фронту двостадійної СВС-реакції з урахуванням старіння фолії.

Corresponding author: Tetyana Vasylivna Zaporozhets  
E-mail: zaptet@ukr.net

*The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy,  
81 Shevchenko Blvd., 18031 Cherkasy, Ukraine*

Please cite this article as: T. V. Zaporozhets and Ya. D. Korol, The Inverse-Problem Approach for Forecasting Characteristics of a Self-Propagating High-Temperature Synthesis in Multilayer Foils in View of Competitive Formation of Phases, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 11: 1541–1560 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.11.1541.

**Ключові слова:** реакційна дифузія, фазоутворення, самопоширювана високотемпературна синтез (СВС), параболічний закон росту, інтерметаліди, багат шарова фольга.

A semi-analytical solution of the inverse problem of the multistage SHS-reaction description is suggested for determining the thermodynamic driving force and parameters of reaction diffusion in a multilayer nanofoil. The method is based on measurements of front temperature and front velocity as functions of the time of isothermal ageing. In order to estimate the front velocity of multistage SHS-reaction with account of foil ageing, the analytical formulae are suggested. Experimental SHS front temperature dependence on isothermal annealing time has linear sections corresponding to the parabolic growth phase sequence and fractures, which are likely corresponding to the beginning of the next phase, changes in diffusion mechanisms, polymorphic transformations, etc. Approximation of temperature dependences is used to evaluate the thermodynamic driving force for each stage. The fitting of the experimental dependences of SHS-front velocity on the isothermal annealing time and the analytical formula values allow us to estimate the diffusion coefficients for each stage.

**Key words:** reaction diffusion, phase formation, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), parabolic growth law, intermetallic compounds, multilayer foils.

*(Получено 22 августа 2016 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в многослойных фольгах с нанометровым периодом слоёв позволяет получить кратковременный локализованный разогрев. Учитывая эту особенность и морфологию системы, фольги целесообразно использовать, в первую очередь, для соединения плоских поверхностей материалов при необходимости ограниченного прогрева [1–3]. При этом важно прогнозировать параметры разогрева (температуру и скорость фронта реакции СВС), а в идеале — задавать их. Это возможно путём выбора химического состава системы, а также варьирования технологических параметров при изготовлении. В частности, соотношения компонентов в слое определяет фазовый состав продукта синтеза и тепловой эффект, период мультислоёв — реактивность фольги (при увеличении периода резко снижается скорость фазообразования в поперечном сечении фольги вследствие параболического закона роста фазовой прослойки [4]). Толщина фольги играет важную роль при наличии активного теплоотвода, который всегда присутствует при пайке или сварке и определяет порог гашения СВС-реакции [5]. Кроме геометрических, существуют и нетривиальные параметры — от скорости вакуумного осаждения и температуры подложки зависит

степень неравновесности системы (например, не успевшие отрелаксировать избыточные вакансии могут существенно изменить эффективный коэффициент диффузии [6]). Более того, температура при изготовлении и условия хранения фольги определяют начальную стадию диффузионного процесса — даже незначительный рост первой фазы на контакте слоёв может изменить порядок фазообразования [7–9]. В случае СВС-реакции появление фаз на стадии изготовления или хранения фольги однозначно снижает реакционность фольги (температуру и скорость), поэтому прослойку продуктов фазообразования до начала СВС мы называем паразитной и определяем коэффициент эффективности СВС-реакции через долю материнских фаз [10].

Для количественных оценок температуры и скорости фронта реакции СВС существуют простые аналитические оценки [11, 4, 12], в которые кроме перечисленных выше параметров входят коэффициент диффузии и тепловой выход экзотермической реакции на один атом (термодинамический стимул). Конечно, для их определения можно использовать табличные величины. Но в неизотермических условиях высокотемпературного синтеза в нанослойных системах могут проявляться размерные эффекты и должны играть важную роль неравновесные факторы, вследствие которых возможны существенные отклонения от стандартной диффузионной теории [13].

Кроме того, не всегда возможно контролировать условия хранения фольг, что влияет на рост паразитной прослойки и изменение концентрации (релаксацию) неравновесных дефектов. Поэтому целесообразно говорить о некоторых эффективных диффузионных и термодинамических параметрах для конкретного класса фольг. Определить эти параметры можно, например, методом аппроксимации экспериментальных зависимостей температуры и скорости реакции некоторыми аналитическими выражениями с искомыми параметрами.

Подобная обратная задача решена нами для одностадийной СВС-реакции: значения термодинамического  $\Delta g$  и диффузионных  $D_0^w$ ,  $Q$  параметров найдены из экспериментальных зависимостей температуры и скорости фронта СВС от времени и температуры изотермического отжига [13]. Поскольку в реальных условиях во фронте реакции наблюдается две и больше фаз, в данной работе мы анализируем применимость такого подхода к решению обратной задачи для многостадийной реакции СВС.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для прогнозирования характеристик СВС-реакции Армстронг [11] предложил аналитическую оценку скорости СВС-фронта  $V_f$  при одностадийной реакции фазообразования в слоистой системе. Справедливости ради заметим, что впервые подобная оценка была предложена в 1938 г. Франк-Каменецким и Зельдовичем для процесса горения с уз-

ким фронтом с точки зрения диффузионной теории [14]. Нами эти формулы уточнены в подходе теории реакционной диффузии с учётом толщины паразитной прослойки  $\Delta y_0$ , выросшей до инициации СВС (рис. 1), и проверены в строгой феноменологической модели [12]:

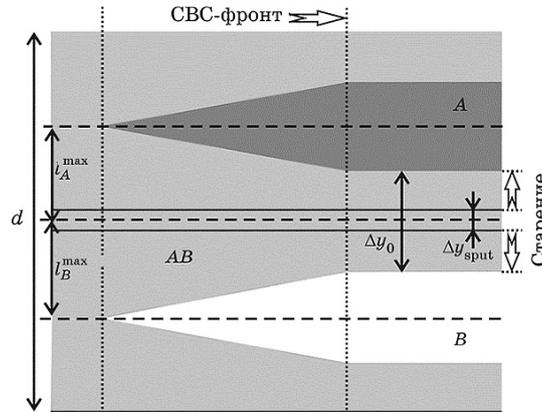
$$V_f = \sqrt{\frac{a^2}{(d/2)^2 - (\Delta y_0)^2} \frac{2D_0^W}{c(1-c)} \frac{\Delta g}{Q} \exp\left(-\frac{Q}{k_B T_f}\right)}, \quad (1)$$

где  $a^2$  — коэффициент температуропроводности,  $c$  — средняя атомная концентрация мультислойной структуры,  $D_0^W$  и  $Q$  — предэкспоненциальный множитель и энергия активации коэффициента диффузии в фазе,  $\Delta g$  — термодинамический стимул реакции на один атом,  $d$  — период мультислоёв фольги.

Температура фронта реакции  $T_f$  при температуре среды  $T_0$  определяется эффективным тепловыделением — в каждом полупериоде  $d/2$  распределяется тепло, выделяемое при реакции в прослойке  $d/2 - \Delta y_0$ , в которой не прошла реакция до начала СВС:

$$T_f = T_0 + \frac{\Delta g}{3k_B} \left(1 - \frac{\Delta y_0}{d/2}\right). \quad (2)$$

В работе [13] в допущении одностадийного фазообразования нами предложен алгоритм оценки термодинамического стимула образования фазы  $\Delta g$  и её диффузных характеристик  $D_0^W$ ,  $Q$  через подгон-



**Рис. 1.** Схема роста фазы в полупериоде  $d/2$  многослойной фольги в процессе изготовления (вакуумное осаждение)  $\Delta y_{\text{sput}}$ , хранения (старение)  $\Delta y_0 - \Delta y_{\text{sput}}$  и непосредственно СВС-реакции  $d/2 - \Delta y_0$ .

**Fig. 1.** The scheme of the phase growth within the multilayer foil semi-period  $d/2$  during manufacturing (vacuum deposition)  $\Delta y_{\text{sput}}$ , storage (ageing)  $\Delta y_0 - \Delta y_{\text{sput}}$  and SHS reaction  $d/2 - \Delta y_0$ .

ку под экспериментальные зависимости снижения температуры и скорости СВС-фронта от доли фазы, выросшей в процессе предварительного изотермического отжига.

Однако на полученных экспериментально зависимостях температуры и скорости СВС-фронта от времени изотермического отжига наблюдаются изломы и резкие перепады обеих характеристик, свидетельствующие о стадийности фазообразования (рис. 5).

Причиной изменения скорости тепловыделения может быть последовательный рост нескольких фаз и/или изменение механизма роста, полиморфные превращения и др.

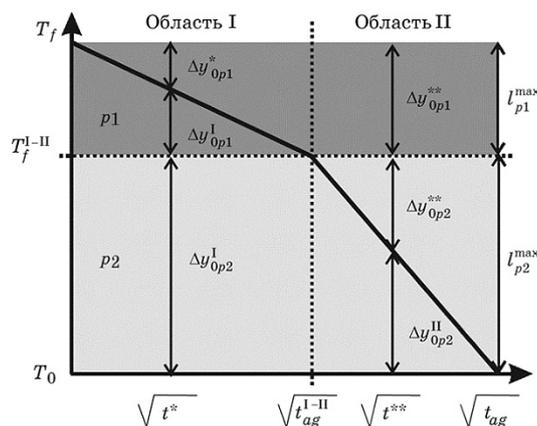
Если рост фаз подчиняется параболическому закону, то на зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  можно выделить отдельные области, в которых температура изменяется линейно  $T_f \sim -\Delta y_0 \sim -t_{ag}^{1/2}$  (рис. 2). В каждой следующей области количество стадий при СВС-реакции уменьшается в результате завершения ещё одной стадии в процессе предварительного изотермического отжига. Это приводит к очередному излому зависимости температуры фронта от корня квадратного времени предварительного отжига  $T_f(t_{ag}^{1/2})$ .

Таким образом, если и при предварительном отжиге, и в условиях СВС реакция протекает путём последовательного образования одних и тех же двух фаз, в зависимости от времени и условий предварительного старения фольги первая стадия частично или полностью и частично вторая реализуются на этапе предварительного изотермического отжига (рис. 2). Например, если на момент отжига  $t^*$  частично выросла первая фаза  $p1$  до толщины  $\Delta y_{0p1}^*$ , то при СВС завершится её рост  $\Delta y_{0p1}^I = l_{p1}^{\max} - \Delta y_{0p1}^*$  и вырастет вторая фаза  $p2$  до максимальной (определённой средней концентрацией слоя и стехиометрией фазы) толщины  $\Delta y_{0p2}^I = l_{p2}^{\max}$ . При более длительном отжиге и росте фазы  $\Delta y_{0p1}^*$  останется меньше прослойки для роста при СВС, что снизит температуру фронта  $T_f$ .

При достижении в процессе отжига первой фазой  $\Delta y_{0p1}^*$  максимальной толщины  $l_{p1}^{\max}$  СВС будет протекать одностадийно с образованием только фазы  $p2$  — на температурной зависимости  $t_{ag}^{I-II}$  появляется излом. На момент отжига  $t^{**}$  вклад в температуру СВС-фронта даст только вторая фаза  $\Delta y_{0p2}^{II} = l_{p2}^{\max} - \Delta y_{0p2}^{**}$ . Можно сделать вывод, что в области I реакция СВС двухстадийная, а в области II — одностадийная.

Для получения экспериментальных зависимостей температуры  $T_f^{\text{exp}}$  и скорости  $V_f^{\text{exp}}$  СВС-фронта от времени отжига  $t_{ag}$  использовалось оригинальное фотоэлектрическое двухканальное устройство. Через две компланарные щели быстродействующие светодиоды фиксировали светящуюся область СВС-фронта. Температура фронта  $T_f^{\text{exp}}$  рассчитывалась по принципу спектральной пирометрии после предварительной калибровки. Скорость фронта реакции  $V_f^{\text{exp}}$  определялась через задержку максимумов свечения фронта по двум каналам [13].

Для упрощения изложения рассмотрим двухстадийную реак-



**Рис. 2.** Схема двухстадийного фазообразования. Изменение наклона зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  температуры фронта СВС-реакции от корня квадратного из времени предварительного старения фольги свидетельствует об изменении количества стадий в процессе СВС-реакции: при времени предварительного старения в области I ( $t_{ag} < t_{ag}^{I-II}$ ) в процессе СВС происходит последовательный рост двух фаз ( $\Delta y_{0p1}^I$  и  $\Delta y_{0p2}^I$ ), при времени предварительного старения в области II ( $t_{ag} > t_{ag}^{I-II}$ ) в процессе СВС происходит рост только второй фазы ( $\Delta y_{0p2}^{II}$ ). Естественно, если при старении использованы все реагенты, то СВС вообще не происходит (на рисунке это соответствует пересечению графиком уровня  $T_0$ ). Область выше зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  описывает стадийность фазообразования при изотермическом отжиге.

**Fig. 2.** The scheme of a two-stage phase formation. The skew of the SHS front temperature dependence on the square root of the preliminary foil ageing time  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  indicates a change the stages number of the SHS reaction: if the preliminary ageing time belongs to the region I ( $t_{ag} < t_{ag}^{I-II}$ ) then the sequential growth of two phases ( $\Delta y_{0p1}^I$  and  $\Delta y_{0p2}^I$ ) takes place during SHS reaction; if  $t_{ag}$  belongs to region II ( $t_{ag} > t_{ag}^{I-II}$ ), then only second phase growth takes place during SHS ( $\Delta y_{0p2}^{II}$ ). Naturally, if the ageing of all reagents are consumed, the SHS does not occur at all (in the figure this corresponds to the level  $T_0$  of the intersection graph). The region above the dependence  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  (above the solid line) describes the phase formation sequence during isothermal annealing.

цию. Начнём с аналитической оценки температуры и скорости фронта, которая необходима для процедуры аппроксимации в обратной задаче.

### 3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ФРОНТА ДВУХСТАДИЙНОЙ СВС-РЕАКЦИИ

При выводе аналитических формул для двухстадийной реакции логично воспользоваться оценками (1) и (2) для одностадийной реакции. Мы предположили, что две последовательные стадии можно

трактовать как последовательное соединение проводников. Очевидно, в такой трактовке ширина фронта должна определяться ширинами фронтов каждой стадии при одинаковой скорости. Это возможно только при условии независимого протекания реакции в пределах каждой стадии (изолированного роста фаз без теплообмена между пространственными областями их роста).

Учтём условие стационарности фронта  $\partial T/\partial t = -V \partial T/\partial x$  и рассмотрим пространственную развёртку фронта  $T(x)$  — именно такой профиль стабилизируется в итерационной процедуре самосогласованной модели для определения скорости фронта и при выводе аналитической формулы (1) для одностадийной реакции [6]. Выход на стационарный режим и сглаживание температурного профиля обеспечивается перераспределением тепла — на рис. 3 представлены пять таких итерационных шагов. При этом происходит перераспределение не только ширины фронта первой  $p1$  и второй  $p2$  фаз (каждая из них определяет отдельную стадию), но и температуры — ромбы показывают реальную температуру при переходе от одной стадии к другой, тогда как горизонтальная прямая соответствует максимальной температуре (2), которая должна быть достигнута после завершения первой стадии с заданным термодинамическим стимулом реакции  $\Delta g_{p1}$ .

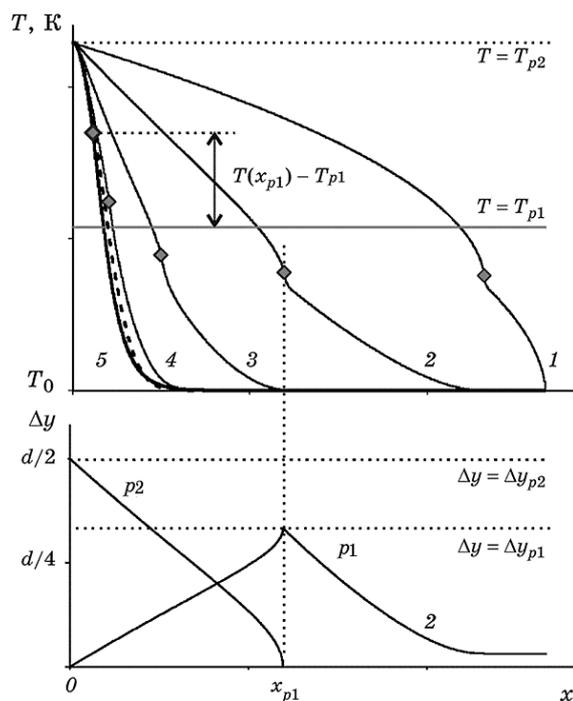
Чтобы фазы согласовали свои скорости роста необходимо согласовать время роста каждой фазы. Если благодаря перераспределению тепла между пространственными областями роста отдельных фаз и изменению температуры  $T(x_{p1}) - T_{p1}$  (и, соответственно, коэффициента диффузии  $D(T(x))$ ) удастся достичь нужного соотношения времён роста фаз, то будет достигнут выход на стационарный режим. Иначе будут возникать периоды разгона и торможения фронта — реакция будет протекать в осцилляционном режиме, что чаще всего и наблюдается в реальных условиях.

Таким образом, фазообразование на отдельных стадиях не является независимым. Более того, температура фронта (за исключением максимальной) не определяется периодом мультископов и термодинамическими стимулами отдельных фаз по формуле (2). Фиксированным является только полное тепловыделение, которое и определяет финальную температуру фронта  $T_f$ . Поэтому представим двухстадийную реакцию как параллельное соединение с постоянным коэффициентом температуропроводности  $a^2$  и фиксированной полной энергией, пропорциональной  $V_f^2$ . Тогда время реакции  $\tau = a^2/V_f^2$  определится временами отдельных стадий  $\tau_{p1}$  и  $\tau_{p2}$  как при параллельном соединении сопротивлений  $\tau = \tau_{p1}\tau_{p2}/(\tau_{p1} + \tau_{p2})$ .

Опуская выкладки, основанные на уравнениях баланса вещества на подвижных межфазных границах, получим выражение для скорости при двухстадийной реакции последовательного роста фаз  $p1$  и  $p2$ :

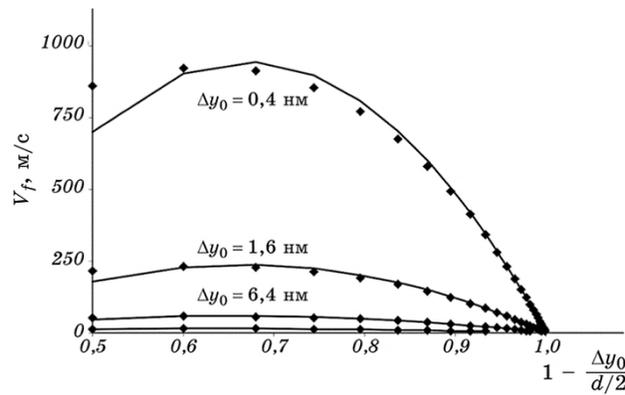
$$V = p^{\text{double}} \frac{\sqrt{a^2}}{\sqrt{\tau_{p1}\tau_{p2}/(\tau_{p1} + \tau_{p2})}}, \quad (3)$$

$$\tau_{p1} = \left( (\Delta y_{p1}^{\text{max}})^2 - (\Delta y_0)^2 \right) \frac{c_{p1}(1 - c_{p1})}{2D_{0p1}^W} \frac{Q_{p1}}{\Delta g_{p1(\alpha, \zeta)}} \exp(Q_{p1}/(k_B T_{p1})),$$



**Рис. 3.** Стабилизация температурного профиля в результате итерационной процедуры в самосогласованной модели двухстадийной реакции. Профиль пунктиром соответствует гауссовскому профилю. Ромбами обозначена температура в моменты перехода между стадиями (в качестве примера на нижнем рисунке приведены профили ширины фазы для шага 2). Горизонтальная прямая соответствует температуре при образовании  $p1$  фазы без теплообмена между областями роста каждой из фаз (определяется  $\Delta g_{p1(\alpha, \zeta)}$ ).

**Fig. 3.** The temperature profile stabilization as a result of an iterative procedure in a self-consistent model of a double stage reaction. Dotted line profile corresponds to a Gaussian profile. The diamonds denote the temperature at the moments of transition between stages (for example, the figure below shows the profiles of the phase width for step 2). The horizontal line corresponds to the temperature during the phase  $p1$  formation without heat exchange between the regions of phases growth (determined by  $\Delta g_{p1(\alpha, \zeta)}$ ).



**Рис. 4.** Зависимости скорости фронта  $V_f$  двухстадийной СВС-реакции от коэффициента эффективности  $1 - \Delta y_0 / (d/2)$  при различных значениях толщины начальной фазы  $\Delta y_0$ : точки получены из аналитической оценки (3), линии — из феноменологической модели [15].

**Fig. 4.** The dependence of the two-stage SHS-reaction front velocity  $V_f$  on the efficiency coefficient  $1 - \Delta y_0 / (d/2)$  for different thickness of the initial phase  $\Delta y_0$ : the points correspond to the analytical estimation (3); line corresponds to the phenomenological model [15].

$$\tau_{p2} = (\Delta y_{p1}^{\max})^2 \frac{(c_{p2} - c_{p1})(1 - c_{p2}) (k_B T_f + Q_{p2})}{(1 - c_{p1}) 2D_{0p2}^W} \frac{T_0}{\Delta g_{p2(\beta, \zeta)} (T_f - T_0)} \exp\left(\frac{Q_{p2}}{k_B T_f}\right).$$

При этом температуры  $T_{p1}$  и  $T_f$  определяются из стандартных формул через термодинамические стимулы с учётом наличия начального слоя фазы (коэффициента эффективности СВС-реакции):

$$T_{p1} = T_0 + \frac{-\Delta g_{p1(\alpha, \zeta)} \Delta y_{p1}^{\max} - \Delta y_0}{3k_B} \frac{1}{2l}, \quad (4)$$

$$T_f = T_{p1} + \frac{-\Delta g_{p2(p1, \zeta)}}{3k_B} = T_0 + \frac{-\Delta g_{p1(\alpha, \zeta)} \Delta y_{p1}^{\max} - \Delta y_0}{3k_B} \frac{1}{2l} + \frac{-\Delta g_{p2(p1, \zeta)}}{3k_B}. \quad (5)$$

Почти полное совпадение с точной самосогласованной моделью [15] достигается при использовании подгоночного множителя  $p^{\text{double}} = 3(1 - \Delta y_0 / (d/2)) - 1$  (рис. 4).

#### 4. МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДВУХСТАДИЙНОГО ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВС

Основными технологическими параметрами многослойной фольги являются средняя концентрация химического состава фольги  $s$  и

период мультислоёв  $d$ . Для оценки термодинамических стимулов отдельных стадий реакции важно учитывать стехиометрию, от которой зависит не только фазовый состав, но и толщины промежуточных фаз. Максимальная толщина фазы определяется исчерпанием одной из материнских фаз для формирования новой стехиометрии  $c_{pi}$  (верхнее выражение описывает случай полного исчерпания левой фазы, нижнее — правой):

$$l_{pi}^{\max} = \min \left\{ \frac{l_{li} (\omega_{ri} - \omega_{li})}{(\omega_{ri} - \omega_{pi})}, \frac{l_{ri} (\omega_{ri} - \omega_{li})}{(\omega_{pi} - \omega_{li})} \right\}, \quad (6)$$

где  $l_{li}$ ,  $l_{ri}$  — толщина левой  $li$  и правой  $ri$  материнских фаз для фазы  $pi$ ,  $\omega$  — объёмная доля компонента  $B$  в соответствующей фазе (при близких атомных объёмах чистых компонентов  $A$  и  $B$  можно заменить атомной концентрацией  $c$ ).

Обеспечить тепловыделение и, соответственно, изменение температуры  $T_f$  при СВС-реакции может только та часть полупериода фольги, которая не прореагировала при старении. Она определяет коэффициент эффективности реакции на  $pi$ -й стадии фазообразования:

$$f_{pi} = 1 - \Delta y_{0pi} / l_{pi}^{\max}. \quad (7)$$

Количество тепла, выделяемое при СВС в процессе образования  $pi$ -ой фазы толщиной  $l_{pi}^{\max}$  с эффективностью  $f_{pi}$ , тратится на прогрев полупериода фольги  $d/2$ . Следовательно, аналогично формуле (2), изменение температуры фронта реакции  $T_f$  при росте  $pi$ -ной фазы зависит от отношения этих толщин:

$$\Delta T_f^{pi} = \frac{\Delta g_{pi} l_{pi}^{\max}}{3k_B d/2} f_{pi}. \quad (8)$$

Температура фронта СВС в области II зависит от тепловыделения при формировании прослойки только второй фазы  $l_{p2}^{\max} - \Delta y_{0p2}$  (рис. 2). В области I роста обеих фаз тепловыделение определяется формированием прослойки первой фазы  $l_{p1}^{\max} - \Delta y_{0p1}$  с учётом отжига и максимальной толщиной прослойки второй фазы  $l_{p2}^{\max}$ . Таким образом, формула (2) для каждой из областей в зависимости от времени предварительного старения имеет вид:

$$T_f^I = T_0 + \Delta T_f^{p1} f_{p1} + \Delta T_f^{p2} = T_0 + \frac{\Delta g_{p1} l_{p1}^{\max}}{3k_B d/2} f_{p1} + \frac{\Delta g_{p2} l_{p2}^{\max}}{3k_B d/2}, \quad (9.I)$$

$$T_f^{II} = T_0 + \Delta T_f^{p2} f_{p2} = T_0 + \frac{\Delta g_{p2} l_{p2}^{\max}}{3k_B d/2} f_{p2}. \quad (9.II)$$

Отметим, что термодинамический стимул образования первой фазы однозначно определяется по правилу общей касательной через термодинамические стимулы чистых компонентов  $\Delta g_{A,B \rightarrow p1}$ , стимул второй фазы — через стимулы первой фазы и остатка одного из чистых компонентов после завершения первой стадии  $\Delta g_{A \vee B, p1 \rightarrow p2}$ .

Используя экспериментальные температуры фронта  $T_f^{\text{exp}}$ , оценим из формул (9) толщину прослоек фаз на каждой области в зависимости от количества стадий:

$$\Delta y_{0p1}^I = l_{p1}^{\max} \left( 1 - \frac{T_f^{\text{exp I}} - (T_0 + (\Delta g_{p2}/3k_B)(l_{p2}^{\max}/(d/2)))}{(\Delta g_{p1}/3k_B)(l_{p1}^{\max}/(d/2))} \right), \quad \Delta y_{0p2}^I = 0, \quad (10.I)$$

$$\Delta y_{0p1}^{II} = l_{p1}^{\max}, \quad \Delta y_{0p2}^{II} = l_{p2}^{\max} \left( 1 - \frac{T_f^{\text{exp II}} - T_0}{(\Delta g_{p2}/3k_B)(l_{p2}^{\max}/(d/2))} \right). \quad (10.II)$$

С другой стороны, если в процессе отжига диффузионный процесс роста фазы  $pi$  описывается параболическим законом, то толщину фазового слоя  $\Delta y_{0pi}$  можно определить из уравнений баланса на его подвижных диффузионных границах:

$$\Delta y_{0pi}^2(t_{ag}) = \Delta y_{\text{sput}}^2 + \frac{2}{c_{pi}(1-c_{pi})} D_{pi}^W(T_{ag}) t_{ag}, \quad (11)$$

где  $D^W(T)$  — интегральный Вагнеровский коэффициент диффузии

$$D_{pi}^W(T) = \frac{c_{pi}(1-c_{pi})(c_{ri}-c_{li})}{(c_{ri}-c_{pi})(c_{pi}-c_{li})} D_{0pi}^W \exp\left(-\frac{Q_{pi}}{k_B T}\right) \frac{\Delta g_{pi}}{k_B T}. \quad (12)$$

В дальнейшем ограничимся случаями, когда образовавшаяся при изотермическом отжиге фаза существенно превышает начальную толщину  $\Delta y_{\text{sput}}$  (рис. 1), так как фольга изготавливается при относительно низких температурах и имеет достаточную толщину слоёв для длительного отжига с сохранением разумной эффективности фольги.

Итак, зная время  $t_{ag}$  и температуру  $T_{ag}$  старения фольги, можно аналитически оценить толщину фаз, образовавшихся на момент инициации СВС:

$$\Delta y_{0p1}^I(T_{ag}, t_{ag}) \approx \sqrt{\frac{2(1-0)D_{0p1}^W}{(1-c_{p1})(c_{p1}-0)} \exp\left(-\frac{Q_{p1}}{k_B T_{ag}}\right) \frac{\Delta g_{p1}}{k_B T_{ag}} t_{ag}}, \quad (13.I)$$

$$\Delta y_{0p2}^{II}(T_{ag}, t_{ag}) \approx \sqrt{\frac{2(c_{r2}-c_{l2})D_{0p2}^W}{(c_{r2}-c_{p2})(c_{p2}-c_{l2})} \exp\left(-\frac{Q_{p2}}{k_B T_{ag}}\right) \frac{\Delta g_{p2}}{k_B T_{ag}} (t_{ag} - t_{ag}^{I-II})}. \quad (13.II)$$

(Чтобы описать линейный рост второй фазы в области II в формуле (13.И) началом отсчёта времени выбрано  $t = t_{ag}^{I-II}$ .)

Комбинируя выражения (10) для толщины фазы при высокотемпературном процессе СВС и выражения (13) при низкотемпературном изотермическом отжиге (в предположении, что термодинамические стимулы не зависят от температуры), можно прийти к аналитической зависимости температуры фронта СВС от времени предварительного отжига:

$$T_f^{\text{exp I}}(t_{ag}) = k_{ag}^I \sqrt{t_{ag}} + b_{ag}^I, \quad (14.I)$$

$$T_f^{\text{exp II}}(t_{ag}) = k_{ag}^{II} \sqrt{t_{ag} - t_{ag}^{I-II}} + b_{ag}^{II}, \quad (14.II)$$

где

$$k_{ag}^I = -\frac{1}{d/2} \frac{\Delta g_{p1}}{3k_B} \sqrt{\frac{2(1-0)D_{0p1}^W}{(1-c_{p1})(c_{p1}-0)} \exp\left(-\frac{Q_{p1}}{k_B T_{ag}}\right) \frac{\Delta g_{p1}}{k_B T_{ag}}},$$

$$b_{ag}^I = T_0 + \underbrace{\frac{\Delta g_{p2}}{3k_B} \frac{l_{p2}^{\max}}{d/2}}_{b_{ag}^{II}} + \frac{\Delta g_{p1}}{3k_B} \frac{l_{p1}^{\max}}{d/2}, \quad (15.I)$$

$$k_{ag}^{II} = -\frac{1}{d/2} \frac{\Delta g_{p2}}{3k_B} \sqrt{\frac{2(c_{r2}-c_{l2})D_{0p2}^W}{(c_{r2}-c_{p2})(c_{p2}-c_{l2})} \exp\left(-\frac{Q_{p2}}{k_B T_{ag}}\right) \frac{\Delta g_{p2}}{k_B T_{ag}}},$$

$$b_{ag}^{II} = T_0 + \frac{\Delta g_{p2}}{3k_B} \frac{l_{p2}^{\max}}{d/2}. \quad (15.II)$$

Таким образом, коэффициенты аппроксимации в каждой области зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  содержат диффузионные и термодинамические параметры стадии реакции, которая частично прошла при изотермическом отжиге, а завершилась уже на этапе СВС.

Аппроксимацию по формулам (14) для каждой области следует проводить на соответствующих интервалах, разделённых точкой перехода между ними  $T_f^{I-II}((t_{ag}^{I-II})^{1/2})$ , которую можно определить визуально, а затем уточнить расчётом как общее решение линейных аппроксимаций в соседних областях.

Свободный член  $b_{ag}$  линейной аппроксимации  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  даёт оценку термодинамического стимула, а угловой коэффициент  $k_{ag}$  — диффузионных характеристик.

По выражению для  $b_{ag}$  в формуле (15) можно оценить значение термодинамического стимула сначала второй фазы, а затем первой. Сопоставив линейную аппроксимацию  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}) = k_{ag} t_{ag}^{1/2} + b_{ag}$  и выражение для  $b_{ag}$ , можно сделать вывод, что тепловыделение на каж-

дой стадии определяется перепадом температуры за время фазообразования, т.е., имея дискретный набор экспериментальных точек, удобно использовать следующую модификацию формул (13):

$$\Delta g_{p1} = 3k_B \left( T_f \Big|_{t_{ag}=0} - T_f^{I-II} \right) (d/2) / l_{p1}^{\max}, \Delta g_{p2} = 3k_B \left( T_f^{I-II} - T_0 \right) (d/2) / l_{p2}^{\max}. \quad (16)$$

Отметим, что оценки (16) термодинамических стимулов справедливы лишь тогда, когда образование фазы на каждой стадии пройдет полностью (продуктом СВС-реакции будет фаза или двухфазная смесь, определяемая фазовой диаграммой для средней концентрации состава фольги).

Для оценки параметров  $k_{ag}$  в формулах (15) можно использовать экспериментальную зависимость скорости фронта от времени старения  $V_f^{\text{exp}}(t_{ag})$ . Для этого переопределим  $\Delta y_0$  в формуле (1) через экспериментальную температуру фронта по формуле (10) с учётом (16) и максимальной толщиной слоя фазы  $l_{pi}^{\max}$  вместо  $d/2$ .

Также, используя коэффициенты  $k_{ag}$  из линейной аппроксимации (14), путём несложных математических преобразований исключим неизвестный диффузионный параметр  $D_{oi}^W$ . Очевидно, что в области II скорость СВС-фронта будет определяться только ростом второй фазы:

$$V_f^{thII} \left( T_f^{\text{exp}}(t_{ag}) \right) = - \frac{k_{ag}^{II} d}{2l_{p2}^{\max}} \frac{3k_B}{\Delta g_{p2}} \times \quad (17.II)$$

$$\times \sqrt{\frac{a^2}{\left( 1 - \frac{T_f^{\text{expII}} - T_0}{(\Delta g_{p2}/3k_B)(l_{p2}^{\max}/(d/2))} \right)^2} \frac{k_B T_{ag}}{Q_{p2}} \exp \left( - \frac{Q_{p2}}{k_B} \left( \frac{1}{T_f^{\text{expII}}} - \frac{1}{T_{ag}} \right) \right)}.$$

Поскольку в области I СВС-реакция двухстадийная, то используем формулу (3) и по аналогии с формулой (17.II) определим скорость:

$$V_f^{thI} \left( T_f^{\text{exp}}(t_{ag}) \right) = - \frac{k_{ag}^I d}{2l_{p1}^{\max}} \frac{3k_B}{\Delta g_{p1}} \times \quad (17.I)$$

$$\times \sqrt{\frac{a^2}{\left( 1 - \frac{T_f^{\text{expI}} - T_f^{I-II}}{(\Delta g_{p1}/3k_B)(l_{p1}^{\max}/(d/2))} \right)^2} \frac{k_B T_{ag}}{Q_{p1}} \exp \left( - \frac{Q_{p1}}{k_B} \left( \frac{1}{T_f^{\text{expI}}} - \frac{1}{T_{ag}} \right) \right)}.$$

Далее, изменяя параметр  $Q_{pi}$ , минимизируем расхождение теоретических  $V_f^{th} \left( T_f^{\text{exp}}(t) \right)$  и экспериментальных  $V_f^{\text{exp}}(t)$  зависимостей в

каждой области и таким образом определим  $Q_{p1}$  и  $Q_{p2}$ .

Из формулы (15) для  $k_{ag}$  найдём предэкспоненциальные множители:

$$D_{0pi}^W = \left( k_{ag} \frac{d}{2} \frac{3k_B}{\Delta g_{pi}} \right)^2 \frac{(c_{ri} - c_{pi})(c_{pi} - c_{li})}{2(c_{ri} - c_{li})} \frac{k_B T_{ag}}{\Delta g_{pi}} \exp\left( \frac{Q_{pi}}{k_B T_{ag}} \right). \quad (18)$$

В случае образования нескольких последовательных фаз необходимо определить точки  $t_{ag}^{(S)-(S-1)}$  изменения наклона зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$ , разделяющие процесс на временные интервалы  $(t_{ag}^{(S)-(S-1)}, t_{ag}^{(S+1)-(S)})$ , и на каждом из них использовать следующий алгоритм:

- 1) определить  $t_{pS}^{\max}$  по формуле (6);
- 2) определить термодинамический стимул  $\Delta g_{pS}$  по формуле (16);
- 3) определить теоретические значения скорости фронта по формуле (17);
- 4) провести процедуру минимизации отклонений экспериментальной и теоретической зависимостей скорости при изменении энергии активации  $Q_{pS}$ ;
- 5) определить предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии  $D_{0pS}^W$  по формуле (18).

Мы не случайно в алгоритме многостадийной реакции в индексах термодинамического стимула и диффузных параметров для обозначения индексов перешли от фаз  $i$  к стадиям  $S$ . Как будет показано ниже, каждой стадии может соответствовать несколько одновременных процессов. В частности, на диффузный процесс может влиять пересыщение вакансионной подсистемы или её инерционность [6]. Поэтому полученные оценки можно считать некоторыми эффективными значениями, которые комплексно учитывают конкуренцию/синергизм процессов на каждой стадии. При этом критерием стадийности уже является не образование определённой фазы, а типичность изменений макрохарактеристик системы. С одной стороны, это является недостатком предложенного описания, а с другой — даёт возможность получить простую, аналитически достижимую оценку, которую можно применить для экспрессного прогнозирования поведения фольг (а именно так и ставилась задача технологами).

Таким образом, если предположить, что при температурах старения, отличных от температуры изотермического отжига  $T_{ag}$  в обратной задаче, термодинамический стимул и коэффициент диффузии незначительно меняются, а также сохраняется порядок фазообразования, то полученные параметры  $\Delta g_{pS}$ ,  $D_{0pS}^W$ ,  $Q_{pS}$  можно использовать для прогнозирования температуры и скорости фронта СВС при заданных температурах и временах старения. Дополнительно можно учесть порог гашения реакции в результате внешнего теплоотвода [5].

## 5. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Для проверки предложенного алгоритма мы использовали фольги:  
**F01:** Ni + 33,7% вес. (52,62 ат.%) Al, толщина  $H = 48$  мкм, период мультислоёв  $d = 500$  нм;

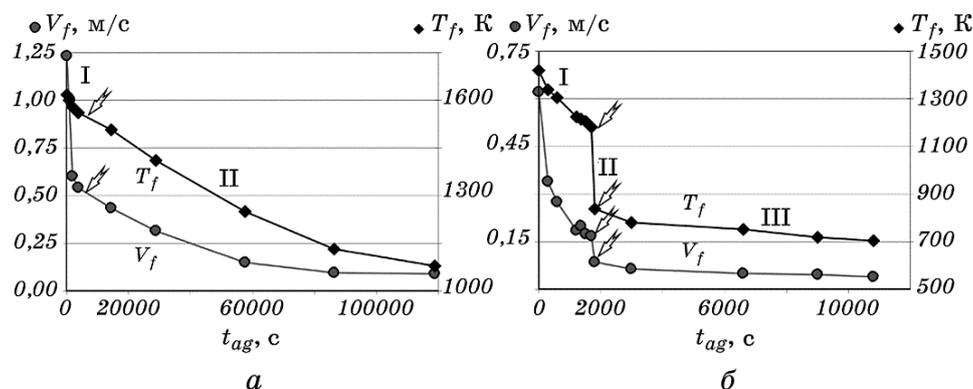
**F02:** Ni + 38,4% вес. (57,67 ат.%) Al, толщина  $H = 52$  мкм, период мультислоёв  $d = 480$  нм.

Зависимости температуры и скорости фронта представлены на рис. 5: для фольги F01 можно выделить две области, а для F02 — три (включая как стадию резкий перепад параметров).

Как следует из аппроксимации зависимости  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  (рис. 6), в отдельных областях существенно отличаются углы наклона (определяющие диффузионные характеристики и скорость фазообразования), а также наблюдаются перепады температуры в пределах каждой области (определяющие энергию образования фазы).

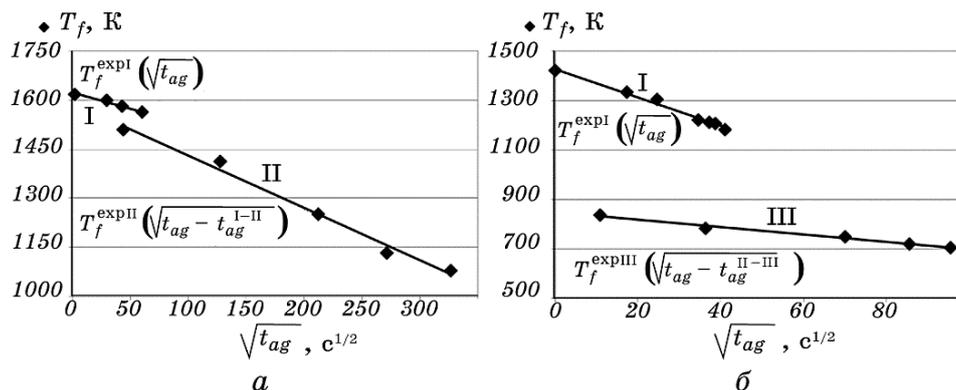
Для оценки  $\Delta g_{pS}$  и  $Q_{pS}$  с помощью формул (16), (17) необходимо знать концентрационный состав предполагаемых фаз, чтобы рассчитать их максимальные толщины  $l_{pS}^{\text{max}}$ . Такую информацию желательно уточнить методами фазового анализа хотя бы для одного времени старения в каждой области зависимости  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$ .

Дифрактограммы фольги F01 показали наличие фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$  в обеих областях и фазу  $\text{Al}_1\text{Ni}_1$  в продукте СВС-реакции. Поэтому причиной излома зависимости  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  для F01 не является появление новой фазы. Резкое падение скорости  $V_f^{\text{exp}}(t_{ag})$  без существенного изменения температуры фронта  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag})$  на первой стадии



**Рис. 5.** Зависимости скорости  $V_f^{\text{exp}}$  и температуры  $T_f^{\text{exp}}$  СВС-фронта от времени старения  $t_{ag}$  для фольги F01 при температуре старения  $T_{agF01} = 523$  К (а) и фольги F02 при температуре старения  $T_{agF02} = 548$  К (б).

**Fig. 5.** The dependences of the front velocity  $V_f^{\text{exp}}$  and front temperature  $T_f^{\text{exp}}$  on the ageing time  $t_{ag}$  for the foil F01 at the ageing temperature  $T_{agF01} = 523$  К (а) and the foil F02 at the ageing temperature  $T_{agF02} = 548$  К (б).



**Рис. 6.** Разделение температурных зависимостей  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  на области двухстадийного (I) и одностадийного (II) фазообразования для фольги F01 (a) и трёхстадийного (I) и одностадийного (III) фазообразования для фольги F02 (б).

**Fig. 6.** Separation of the temperature dependences  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  on the regions of two-stage (I) and single-stage (II) phase formation for the foil F01 (a) and a three-stage (I) and a single-stage (III) phase formation for the foil F02 (б).

(рис. 5, a) может свидетельствовать о наличии быстрых диффузионных путей в течение непродолжительного времени. При этом рост фазы незначительный, поскольку тепловой выход реакции  $\Delta g_{pl}^{\text{F01}}$  относительно небольшой. Это возможно при латеральном разрастании тонкого начального слоя фазы. Также, учитывая большое вакансионное пресыщение вследствие особенностей изготовления фольги, причиной такого поведения может быть быстрая аннигиляция вакансий на начальном этапе реакционной диффузии [13].

Для фольги F02 также на первых двух стадиях идентифицируются линии фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$ , но продукт СВС имеет состав фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ . Сопоставив первые две стадии (с достаточно большим стимулом и бесконечно малым коэффициентом диффузии на второй из них), мы пришли к следующим выводам. Возможно, первой растёт метастабильная фаза  $\text{Al}_9\text{Ni}_2$  (она имеет богатый спектр относительно слабых дифракционных линий, которые в основном совпадают с линиями  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$  [17]). Тогда вторая стадия может соответствовать превращению фазы  $\text{Al}_9\text{Ni}_2$  в  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$ . На третьей стадии продолжается рост фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$ , но уже из чистых компонентов. Заметим, что наличие метастабильной фазы после низкотемпературного отжига и закалки (моментальное охлаждение фольги на воздухе благодаря малой толщине) вполне вероятно.

Полученные параметры  $\Delta g_{pS}$ ,  $D_{0pS}^W$ ,  $Q_{pS}$  (табл. 1) указывают на возможность процессов с малым тепловыделением (при  $S = 1$  для

**ТАБЛИЦА 1.** Оценки термодинамического стимула и диффузионных параметров для прогнозируемых стадий фазообразования в фольгах F01 и F02.**TABLE 1.** The estimates of the thermodynamic driving force and diffusion parameters for the predicted phase formation stages in the foils F01 and F02.

Фольга	Стадия $S$	Прогнозируемая фаза	$\Delta g$ , эВ	$D_0^W$ , м <sup>2</sup> /с	$Q$ , эВ
F01	1	$\text{Al}_3\text{Ni}_1$	не известна толщина прослойки, так как фаза не достигла $l_{ps}^{\max}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$	1,38
	2	$\text{Al}_3\text{Ni}_1$	0,2165	$1,36 \cdot 10^{-5}$	1,62
	3	$\text{Al}_1\text{Ni}_1$	0,2256	отсутствует реакция СВС	
F02	1	$\text{Al}_9\text{Ni}_2$	0,8056	$1,83 \cdot 10^{-7}$	1,22
	2	$\text{Al}_9\text{Ni}_2 \rightarrow \text{Al}_3\text{Ni}_1$	0,1621	безактивационное превращение	
	3	$\text{Al}_3\text{Ni}_1$	0,2436	$2,33 \cdot 10^{-3}$	1,63
	4	$\text{Al}_3\text{Ni}_2$	0,0760	отсутствует реакция СВС	

F01, при  $S = 3$  для F02) и безактивационных процессов (при  $S = 2$  для F02). Под безактивационным процессом в данном случае мы понимаем недиффузионное преобразование (например, полиморфное) со значительным тепловыделением.

В оценках учитывалось, что фаза, наблюдаемая на последней стадии рис. 6, не является финальной фазой при СВС. Более того, её рост не заканчивается в момент перехода через точку горения–гашения реакции (последняя точка на зависимостях от времени отжига). При дальнейшем отжиге образцов (уже без возможности инициации в них СВС) методом дифрактометрии мы определили, что ещё в течение некоторого времени наблюдается рост фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$ . Поэтому для оценки термодинамического стимула последней фазы определялись значения температуры фронта из линейной экстраполяции зависимости  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$  на момент окончания роста фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$  из данных дифрактометрии (для фольги F01 — 973 К при 162000 с, для F02 — 584 К при 27000 с).

Предложенный алгоритм даёт корректные оценки в случае роста различных фаз на каждой из стадий. Если фаза  $pi$  меняет закон роста и представляет несколько стадий зависимости  $T_f^{\text{exp}}(t_{ag}^{1/2})$ , то необходимо учитывать, что максимальная толщина фазы  $l_{pi}^{\max}$  достигается совокупно на этих стадиях.

Общий тепловой выход на один атом в результате всех стадий для фольги F01 ( $\text{Al}_1\text{Ni}_1$ ) по оценкам предложенной модели составляет

0,37 эВ, для фольги F02 ( $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ) — 0,3044 эВ. Отметим, что эффективный стимул последовательности первых двух стадий для F01, в результате которых образуется фаза  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$ , составляет 0,2316 эВ и почти равен стимулу 0,2436 эВ образования фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$  из чистых компонентов для F02 (стадия 3). Незначительное отличие может быть связано с существованием тонкого начального слоя фазы  $\Delta y_{\text{sput}}$  в результате изготовления и естественного старения фольги, которым мы пренебрегли в расчётных формулах (13). Причиной различия в начальной фазе может быть более высокая температура осаждения фольги F01, что могло способствовать росту начального слоя фазы  $\text{Al}_3\text{Ni}_1$  и подавить формирование фазы  $\text{Al}_9\text{Ni}_2$ .

## 6. ВЫВОДЫ

Полученные оценки эффективных стимулов реакции и коэффициентов диффузии дают возможность экспрессного прогнозирования температуры и скорости фронта СВС-реакции для соответствующего класса фольг. При этом отклонение зависимости  $T_f(t_{ag}^{1/2})$  от линейного закона как раз можно считать проявлением особых режимов, требующим детального исследования.

Преимуществами предложенного метода являются естественный учёт в эффективных параметрах различных диффузионных механизмов, возможных структурных дефектов, особых фазовых превращений и метастабильных фаз. Особенности изготовления, старения и высокотемпературной нестационарной СВС-реакции могут изменять порядок фазообразования, описываемый равновесной фазовой диаграммой. При этом благодаря комбинации в описанном алгоритме стационарного низкотемпературного изотермического отжига и нестационарного высокотемпературного синтеза модель приобретает сходство с реальным жизненным циклом фольг. Изотермический отжиг имитирует естественный процесс старения, что может быть важно для прогнозирования эффективности фольги в процессе хранения и, возможно, подбора параметров системы и режимов изготовления фольг для искусственной инициации медленно растущей фазы с целью продления эффективности фольг при хранении.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на базе Учебно-научного центра физико-химических исследований Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого.

Авторы благодарны проф. А. М. Гусаку за полезные консультации и дискуссии, а также проф. А. И. Устинову (Институт электро-

сварки им. Е. О. Патона) за предоставленные фольги для проведения экспериментов.

Работа поддержана Министерством образования и науки Украины (проект 0116U004691 и проект 0115U000638) и 7-й рамочной программой Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий (проект FP-7, Marie Curie, IRSES, No. 612552).

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Ищенко, Ф. В. Фальченко, А. И. Устинов, *Автоматическая сварка*, **7**: 5 (2007).
2. А. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, T. V. Melnichenko, L. V. Petrushinets, K. V. Lyapina, A. E. Shishkin, and V. P. Gurienko, *The Paton Welding Journal*, **9**: 13 (2015).
3. <http://www.indium.com/nanofoil/>
4. B. Mann, A. J. Gavens, M. E. Reiss, D. Van Heerden, G. Bao, and T. P. Weihs, *J. Appl. Phys.*, **82**, No. 3: 1178 (1997).
5. Т. В. Запорожец, А. М. Гусак, А. И. Устинов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 8: 1075 (2011).
6. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, and A. I. Ustinov, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, **19**, No. 4: 227 (2010).
7. J. C. Trenkle, L. J. Koerner, M. W. Tate, S. M. Gruner, T. P. Weihs, and T. C. Hufnagel, *Appl. Phys. Lett.*, **93**: 081903 (2008).
8. Ping Zhu, J. C. M. Li, and C. T. Liu, *Mater. Sci. Eng. A*, **329–331**: 57 (2002).
9. F. Baras and O. Politano, *Phys. Rev. B*, **84**, No. 2: 024113 (2011).
10. R. Knepper, M. R. Snyder, G. Fritz Greg, K. Fisher, O. M. Knio, and T. P. Weihs, *J. Appl. Phys.*, **105**: 083504 (2009).
11. R. Armstrong and M. Koszykowski, *Proc. Int. Symp. on the Combustion and Plasma-Synthesis of High-Temperature Materials (Oct. 23–26, 1988, San Francisco)*, paper No. 6.
12. Т. В. Запорожец, А. М. Гусак, А. И. Устинов, *Совр. электрометаллургия*, **1**: 40 (2010).
13. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, Ya. D. Korol, and A. I. Ustinov, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, **22**, No. 4: 222 (2013).
14. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий, *Журн. физ. химии*, **12**: 100 (1938).
15. Т. В. Запорожец, А. М. Гусак, А. И. Устинов, *Совр. электрометаллургия*, **3**: 38 (2012).
16. K. J. Blobaum, D. Van Heerden, A. J. Gavens, and T. P. Weihs, *Acta Mater.*, **51**: 3871 (2003).
17. C. Pohla and P. L. Ryder, *Acta Mater.*, **45**, No. 5: 2155 (1997).

## REFERENCES

1. A. Ya. Ishchenko, F. V. Fal'chenko, and A. I. Ustinov, *Avtomaticheskaya Svarka*, **7**: 5 (2007).
2. A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, T. V. Melnichenko, L. V. Petrushinets, K. V. Lyapina, A. E. Shishkin, and V. P. Gurienko, *The Paton Welding*

- Journal*, **9**: 13 (2015).
3. <http://www.indium.com/nanofoil/>
  4. B. Mann, A. J. Gavens, M. E. Reiss, D. Van Heerden, G. Bao, and T. P. Weihs, *J. Appl. Phys.*, **82**, No. 3: 1178 (1997).
  5. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, and A. I. Ustinov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 8: 1075 (2011) (in Russian).
  6. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, and A. I. Ustinov, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, **19**, No. 4: 227 (2010).
  7. J. C. Trenkle, L. J. Koerner, M. W. Tate, S. M. Gruner, T. P. Weihs, and T. C. Hufnagel, *Appl. Phys. Lett.*, **93**: 081903 (2008).
  8. Ping Zhu, J. C. M. Li, and C. T. Liu, *Mater. Sci. Eng. A*, **329–331**: 57 (2002).
  9. F. Baras and O. Politano, *Phys. Rev. B*, **84**, No. 2: 024113 (2011).
  10. R. Knepper, M. R. Snyder, G. Fritz Greg, K. Fisher, O. M. Knio, and T. P. Weihs, *J. Appl. Phys.*, **105**: 083504 (2009).
  11. R. Armstrong and M. Koszykowski, *Proc. Int. Symp. on the Combustion and Plasma-Synthesis of High-Temperature Materials (Oct. 23–26, 1988, San Francisco)*, paper No. 6.
  12. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, and A. I. Ustinov, *Sovr. Elektrometallurgiya*, **1**: 40 (2010) (in Russian).
  13. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, Ya. D. Korol, and A. I. Ustinov, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, **22**, No. 4: 222 (2013).
  14. Ya. B. Zel'dovich and D. A. Frank-Kamenetskiy, *Zhurn. Fiz. Khimii*, **12**: 100 (1938) (in Russian).
  15. T. V. Zaporozhets, A. M. Gusak, and A. I. Ustinov, *Sovr. Elektrometallurgiya*, **3**: 38 (2012) (in Russian).
  16. K. J. Blobaum, D. Van Heerden, A. J. Gavens, and T. P. Weihs, *Acta Mater.*, **51**: 3871 (2003).
  17. C. Pohla and P. L. Ryder, *Acta Mater.*, **45**, No. 5: 2155 (1997).