

Оценка максимального поперечного размера многослойных биметаллических пленок для протекания в них самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на примере структуры Ni/Al

© О.Е. Квашенкина,¹ Е.Д. Эйдельман,^{1,2,¶} В.С. Осипов,¹ П.Г. Габдуллин,¹ Б.Б. Хина³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт НАН Беларуси, 220141 Минск, Беларусь

¶ e-mail: eidelman@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 27 ноября 2019 г.

Принято к публикации 21 января 2020 г.

Для моделирования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (твердопламенного горения) за основу взята слоистая модель, в которой продукт формируется между слоями исходных реагентов за счет твердофазной диффузии в неизотермических условиях, при этом волна горения распространяется вдоль этих слоев. Оказалось, что в высокотемпературный расплав будут целиком превращаться шнуры из слоев алюминия и никеля толщиной до $50 \mu\text{m}$. Результаты расчетов позволят оптимизировать процессы сварко-пайки термочувствительных материалов и деталей электронных компонентов различных устройств.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, твердопламенное горение, твердофазная диффузия, слоистая модель, сварко-пайка.

DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49455.379-19

Введение

В последние годы активно развиваются исследования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза — твердопламенного горения (SFB), в многослойных тонких биметаллических пленках, где толщина слоев металлических реагентов, например, Ni–Al, Ti–Al, Pt–Al и др., составляет от 20 до 100 nm, а количество пар слоев достигает 2000 [1]. В отличие от традиционного SFB, где скорость волны горения составляет от 0.1 до 10 cm/s в зависимости от реакционной системы [2], SFB в многослойных нанопленках протекает с весьма высокой скоростью, достигающей от 1 до нескольких десятков m/s [1,3]. Адиабатическая температура SFB T_{ad} определяется составом системы: например, в системе Ni 50–Al 50 at.% при формировании фазы NiAl $T_{ad} = 1910 \text{ K}$.

Реакционноспособные фольги, суммарная толщина которых составляет 10–100 μm , получают методом магнетронного распыления мишеней [3] и используют для соединения (сварко-пайки) термочувствительных материалов и деталей, таких как аморфные сплавы и электронные компоненты [3]. Волна горения, пробегающая по такой фольге, расплавляет слои припоя, расположенные по обе стороны от фольги, что обеспечивает надежное соединение объектов, и при этом нагрев последних незначителен и не нарушает их структуру [3,4].

Известно, что интенсивное взаимодействие в волне SFB, обеспечивающее основное тепловыделение, начинается после плавления одного из металлических реагентов. Формирование продукта протекает по специфическим, часто неравновесным механизмам [2,5]. Наиболее изученной является система Ni–Al, в которой экспериментально выявлен механизм взаимодействия при горении многослойных нанопленок [6]: при нагреве в волне SFB вначале на границе Ni (sol.)/Al (sol.) формируется тонкая прослойка соединения NiAl (sol.). После плавления алюминия она растворяется в расплаве, и на границе Ni (sol.)/Al (liq.) образуются зародыши NiAl и происходит растворение никеля в алюминии. Конечный продукт — зерна NiAl — формируются в пересыщенном расплаве. Такой механизм является весьма сложным, и лишь отдельные его стадии исследованы методом молекулярной динамики [6].

Для моделирования SFB в такой системе за основу обычно берут слоистую модель [7], в которой продукт формируется между слоями исходных реагентов за счет твердофазной диффузии в неизотермических условиях, при этом волна горения распространяется вдоль этих слоев. При этом в работах по моделированию SFB в нанопленках Ni–Al, где продуктом является фаза NiAl [8–10], параметры, входящие в формулу Аррениуса для коэффициента диффузии: предэкспоненциальный фактор D_0 и энергия активации E , определяются путем

варьирования, чтобы обеспечить согласование расчетной и экспериментальной скорости горения. Расчеты коэффициента диффузии D по формуле Аррениуса с экстраполяцией в область более высоких температур [8–12] показывают, что величины D , основанные на экспериментальных данных [13], находятся в интервале между значениями D , использованными при моделировании в работах [8–10].

Как отмечено в [4], это свидетельствует о том, что диффузионно-контролируемые реакции в принципе могут обеспечить скорость SFB в многослойных наносистемах — шнурах, величиной порядка $\sim 1\text{--}10\text{ м}^2/\text{с}$. Следовательно, относительно простая слоистая модель [7–10], основанная на этой концепции, может быть использована для оценочных расчетов.

Для оценки области применимости таких шнуров и, в частности, их критического диаметра, обеспечивающего протекание процесса пайки, в настоящей работе будет разработана тепловая модель с учетом кинетики взаимодействия в волне SFB.

Главными предположениями идеальной теории SFB являются следующие:

- наличие полного контакта между реагентами;
- протекание взаимодействия между реагентами, в настоящей работе алюминием Al и Ni, через растущий слой продуктов AlNi по механизму реакционной диффузии с принятой ниже энергией активации диффузии $E = 137\text{ кДж/моль}$, при этом скорость тепловыделения пропорциональна скорости массообмена — диффузии реагентов через этот слой.

Результаты расчетов позволят оптимизировать процессы сварко-пайки, термочувствительных материалов и деталей электронных компонентов различных устройств.

1. Постановка задачи

Задача ставится так: оценить возможность ситуации и параметры многослойных наносистем, когда из-за теплоотвода от горящего провода, состоящего из нанослоев AlNi, к окружающему веществу горение погаснет. Теплоотвод возможен либо во внешнюю среду, либо в области провода, которые еще не сгорели. Те области провода, которые уже сгорели, считаются утраченными, „израсходованными“ и в процессе теплоотвода не участвующими.

В простейшей постановке [7] в задаче рассматривается система из упорядоченных слоев реагентов, обладающих идеальным тепловым контактом.

Важным критерием является параметр — ε , определяющий соотношение максимальных значений диффузии D_0 и теплопроводности λ в системе, имеющей плотность ρ и теплоемкость $c = 525 + 0.113T - 13 \cdot 10^6/T^2$ (J/(kg · K)). [14]. Параметр имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{D_0 c \rho}{\lambda \gamma}, \quad (1)$$

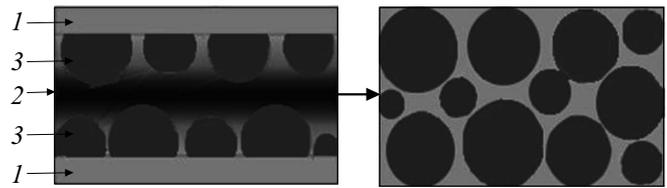


Рис. 1. Качественная картина, показывающая процесс образования продуктов реакции $\text{Al} + \text{Ni} = \text{NiAl}$: 1 — непрореагировавший Ni в твердом состоянии; 2 — непрореагировавший Al в жидком состоянии; 3 — продукт реакции NiAl в твердом состоянии в виде шарообразных частиц. Слева — процесс горения. Справа — NiAl после остывания, причем практически весь объем будет занимать только зерна NiAl (sol.)

где в рассматриваемом диапазоне температур от температуры горения T_b и до температуры окружающей среды T_0

$$\gamma = \frac{RT_b^2}{E(T_b - T_0)}. \quad (2)$$

Как обычно, R — газовая постоянная.

При идеальном тепловом контакте и чисто твердофазном механизме горения типичными значениями критериев оказываются $\gamma \leq 0.1$, $\varepsilon < 0.01 \ll 1$. Таким образом, в идеальной модели SFB скорость теплопереноса значительно превышает скорость диффузионного транспорта реагентов. Этот факт позволяет существенно упростить задачу.

Видимо, горение прекратится, когда теплота Q_r , выделяющаяся в объеме при реакции $\text{Al} + \text{Ni} = \text{AlNi} + Q_r$, из-за влияния глубины химического превращения реагентов η перестает превышать теплоотдачу через границы зоны реакции, имеющей размер d . Горение прекращается, когда волна горения прошла и произошло догорание.

Выделяющаяся теплота зависит от четырех факторов.

Первое — это тепловыделение в единице объема Q , которое, в свою очередь, определяется теплотой реакции $Q_r = 120\text{ кДж/моль}$, плотностью AlNi $\rho = 5.68 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ и молярной массой этого соединения $M = 85 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$. Имеем $Q = \rho Q_r / M = 8 \cdot 10^9\text{ (J/м}^3\text{)}$.

Второй фактор — это количество прореагировавшего вещества, которое определяется диффузией. Поскольку температура плавления Ni: $T_{\text{melt}}(\text{Ni}) = 1728\text{ К}$ гораздо выше температуры плавления Al: $T_{\text{melt}}(\text{Al}) = 933\text{ К}$, то происходит диффузия твердого Ni в расплавленный Al. Коэффициент диффузии такого процесса определяется в [6] и подтвержден в [8]. Имеем $D = D_0 \exp(-E/RT)$, где пред — экспоненциальный множитель $D_0 = 2.18 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$, энергия активации $E = 137\text{ кДж/моль}$, $R = 8.31\text{ J/(моль} \cdot \text{К)}$ — газовая постоянная. Отметим, что энергия активации фактически совпадает, а предэкспоненциальный множитель на 4–8 порядков больше, чем для реакции в порошках при той же температуре.

Третий фактор связан с тем, что реакция происходит на твердой поверхности. Такой поверхностью является поверхность образовавшихся продуктов реакции — поверхность частиц AlNi. Ведь температура плавления продуктов реакции AlNi: $T_{melt}(P) = 1911$ К больше, чем $T_{melt}(Ni)$. Как и, например, в [6] делается естественное предположение, что поверхностями частиц AlNi являются сферы (рис. 1).

Фактически площадь S поверхности, на которой происходит реакция, является подгоночным параметром.

Главное самое грубое предположение, которое будет использоваться в дальнейшем расчете, заключается в том, что выделяющая теплота считается обратно пропорциональной S . В расчет теплоты войдет отношение D_0/S . Ведь естественно считать, что чем площадь поверхности AlNi больше, тем труднее атому Ni „найти“ атом Al. Величина D_0/S соответствует предэкспоненциальному множителю — скорости реакции по закону Аррениуса.

Четвертый фактор, определяющий выделение тепла, определяет специфику элементарного акта взаимодействия атомов Al и Ni. Ведь для реальной границы жидкость–твердое тело, на которой происходит реакция в гетерогенной системе, даже в случае идеального контакта, необходимо учитывать изменение вероятности смешения из-за имеющей место в данном конкретном состоянии глубины химического превращения. Эта величина определяется, в частности, стереохимическими, а также многими другими условиями. Каждый акт взаимодействия Al и Ni специфичен, но можно выделить ячейку с такими размерами, что реакция в ней будет происходить, как в случае гомогенной — объемной реакции, а учет специфики сведется к умножению на некоторую функцию $\varphi(\eta)$. Выбор конкретного вида такой функции во многом произволен. Ясно только, что эта функция должна убывать с ростом глубины химического превращения η . Обычно выбирают $\varphi(\eta) = \exp(-m\eta)$ (см., например, [2]), где m — безразмерный параметр глубины химического превращения. При отсутствии отличий, вносимых гетерогенностью, при $\eta = 0$ получим $\varphi(\eta) = 1$. Этот случай соответствует реакции в гомогенной среде.

Итак, выделение тепла может быть записано как

$$\frac{\rho}{M} Q_r \frac{D_0}{S} \varphi(\eta) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (3)$$

Кроме того, тепло может прийти в данное место с координатой x в результате процесса теплопроводности. Общее количество тепла станет

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\rho}{M} Q_r \frac{D_0}{S} \varphi(\eta) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (4)$$

Расход тепла после догорания записать гораздо проще. Расход определяется, первое, теплоотдачей с коэффициентом $\alpha = 5.6$ J/(m² · s · K), практически одинаковым для всех материалов, отдающих тепло в воздух. Например,

для цилиндрического образца диаметра d при температуре воздуха $T_0 = 300$ К это

$$\frac{4\alpha}{d}(T - T_0). \quad (5)$$

Второе — это тепло, уносимое со скоростью $U = 10$ м/с волной горения. Имеем

$$c\rho U \frac{dT}{dx}. \quad (6)$$

Основная система уравнений, записанная [2], в предположениях, сделанных выше, состоит из уравнения теплового баланса

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - c\rho U \frac{dT}{dx} + \frac{\rho}{M} Q_r \frac{D_0}{S} \varphi(\eta) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) - \frac{4\alpha}{d}(T - T_0) = 0 \quad (7)$$

и уравнения, определяющего влияние глубины химического превращения реагентов:

$$U \frac{d\eta}{dx} - \frac{D_0}{S} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot \varphi(\eta) = 0. \quad (8)$$

Граничные условия:

$$x = 0 - \infty; T = T_0; \eta = 0, \quad (9)$$

$$x = +\infty: \frac{dT}{dx} = \frac{d\eta}{dx} = 0. \quad (10)$$

2. Максимальная толщина и длина слоев, выгорающих при зажигании их соприкасающихся поверхностей

Толщина d является тем параметром, который требуется определить. Максимально возможное значение d_{max} найдем сначала из условия, что теплота не приходит в процессе теплопроводности и не уносится волной горения, а только уходит во вне.

Имеем

$$Q \frac{D_0}{\pi d^2} \exp\left(-m - \frac{E}{RT}\right) = \frac{4\alpha}{d}(T - T_0). \quad (11)$$

При записи этого уравнения использовано, что конец процесса горения означает полное химическое превращение и, значит, $\eta = 1$, а площадь $S = \pi d^2$. Конечно, „подгоночный характер“ величины S при этом перенесен на безразмерный параметр m . Найдем зависимость искомой величины от температуры:

$$d_{max}(T) = Q \frac{D_0}{4\pi\alpha(T - T_0)} \exp\left(-m - \frac{E}{RT}\right). \quad (12)$$

Результаты представлены на рис. 2

Возможны два варианта окончания процесса.

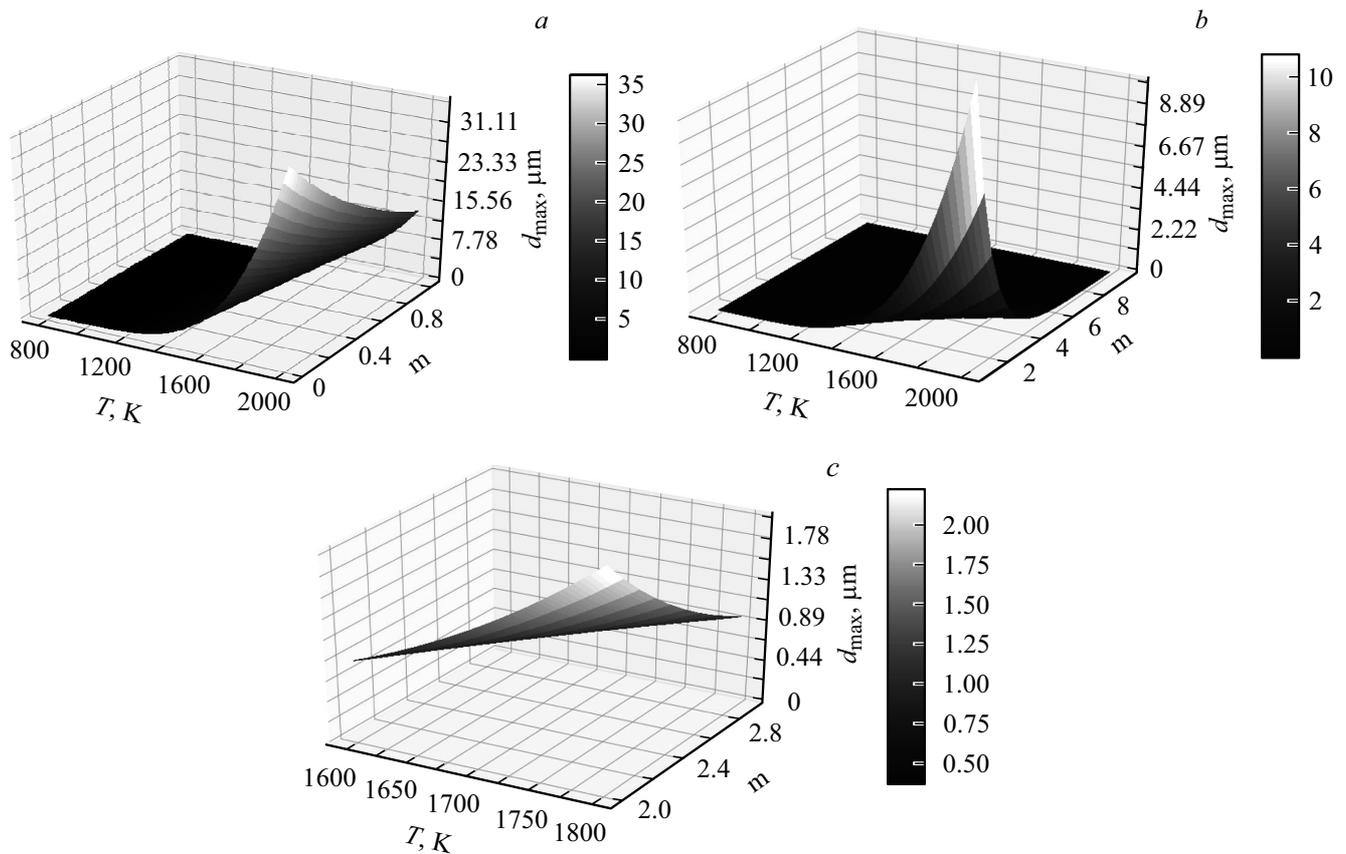


Рис. 2. Максимальная толщина d_{max} слоев, выгорающих при зажигании их соприкасающихся поверхностей в соответствии с результатом (12) при температурах T от 800 до 2000 К (*a, b*) и от 1600 до 1800 К (*c*) и при различных по порядку величины m безразмерного параметра глубины химического превращения. m от 0 до 1 (*a*); m от 0 до 10 (*b*), от 2 до 3 (*c*). На части (*c*) видны оптимальные параметры процесса $T \approx 1700$ К и $m \approx 2.5$.

Первый — полное исчерпание одного из элементов. Например, если Al сгорает 1 mole, и он полностью израсходован, то образуется 1 mole AlNi объемом $M/\rho = 85.7 \cdot 10^{-3} / 5.86 \cdot 10^3 = 14.6 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^3\text{)}$. Если было использовано ν mole Al, и это соответствует проводу длиной l , то диаметр этого шнура

$$d_{max} = \sqrt{\nu \frac{4M}{\pi \rho l}} = 4.3 \cdot 10^{-3} m \sqrt{\frac{\nu}{l} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}}. \quad (13)$$

Этот результат, очевидно, верен при любой температуре — лишь бы горение имело место.

Второй путь, как уже было указано, это окончание процесса горения понижением температуры [15]. Начнем с температуры $T = T_1 = 400$ К. Тогда по формуле (12) имеем $d_{max}(400 \text{ К}) = 1.8 \cdot 10^{-15} \exp(-m) \text{ (m)}$. Очевидно, что при такой температуре процесс развиваться не начнет. При $T = T_2 = 800$ К максимальный диаметр сгоревшей части будет $d_{max}(800 \text{ К}) = 1 \cdot \exp(-m) \text{ (}\mu\text{m)}$.

Можно оценить толщины, при которых полученный жидкий продукт будет использован, и останется твердая оболочка. Это произойдет при температурах лишь немногим меньших, чем $T = T_{melt}(\text{AlNi}) = 1911$ К. Тогда $d_{max}(1911 \text{ К}) = 9 \cdot \exp(-m) \text{ (cm)}$.

Сравнивая вклады процессов, определяющих расход тепла (5) и (6), например, при $T = 1000$ К найдем

$$\frac{c\rho U}{\alpha} \approx 10^5. \quad (14)$$

Это означает, что пока горение продолжается, основным процессом, определяющим расход, является уход тепла с волной горения.

Конечно, теплоотдача во внешнюю среду имеет место при любой температуре. Как видно из (7) и (11), при повышении T теплоотдача во внешнюю среду увеличивается линейно, а тепловыделение реакции — по экспоненте, а значит, гораздо быстрее. Получается, что для качественных оценок толщины, при которых останется твердая оболочка, при высоких температурах теплоотдачей во внешнюю среду можно пренебречь. Этот вывод не изменится и при учете теплоотдачи излучением во внешнюю среду.

Поэтому уравнение (7) примет вид

$$c\rho U \frac{dT}{dx} = \frac{\rho}{M} Q_r \frac{D_0}{\pi d_{max}^2} e^{-m} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (15)$$

Применяя преобразование Франк-Каменецкого,

$$\frac{E}{RT} \approx \frac{E}{RT_0} - \frac{E}{RT_0^2}(T - T_0) = a - a \frac{T - T_0}{T_0}, \quad (16)$$

верное с точностью до величины γ (см. (2)), и пренебрегая зависимостью теплоемкости от температуры, уравнение (15) легко решить. С использованием граничного условия (9) получим

$$\frac{x}{d_{\max}} = A(1 - e^{-a(T-T_0)/T_0}).$$

Число A определяет соотношение выгорающей длины слоя x_{\max} к его поперечному размеру при окончании процесса горения. Находим

$$\frac{x_{\max}}{d_{\max}} = A = \frac{\pi d_{\max} c \rho U R T_0^2}{Q E D_0} \exp\left(\frac{E}{RT_0}\right) \times e^m \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{E}{RT_0} \left(-\frac{E}{RT_0}\right) \left(\frac{T_b}{T_0} - 1\right)\right] \right\}. \quad (17)$$

При подстановке в правую часть d_{\max} в соответствии с формулой (12), в которой проведено преобразование (16), получим

$$\frac{x_{\max}}{d_{\max}} = \frac{c \rho U R T_0}{4 \alpha E (T_b/T_0 - 1)} \exp\left[\frac{E}{RT_0} \left(\frac{T_b}{T_0} - 1\right) - 1\right]. \quad (18)$$

Как и можно было ожидать, длина сгорающего шнура намного порядков больше его диаметра, даже при T_b/T_0 длина превышает диаметр в миллион раз.

Заключение и выводы

Можно сделать качественный вывод, что в высокотемпературный расплав будут целиком превращаться шнуры из слоев алюминия и никеля толщиной до $50 \mu\text{m}$.

Известно, что SFB-процесс некоторых систем можно погасить за счет интенсивного теплоотвода во внешнюю среду (см. эксперименты [16]). К моменту завершения подготовки настоящей работы авторам были неизвестны работы, где было бы указано на гашение горения многослойных наносистем–шнура, из-за теплоотдачи во внешнюю среду. Однако недавно гашение горения многослойных нанопленок системы Ni–Al на металлической подложке с высокой теплопроводностью (Cu и Al) наблюдалось экспериментально [17], и в качестве меры борьбы с этим нежелательным явлением предлагалось наносить на поверхность подложки тонкое барьерное покрытие с низкой теплопроводностью, например $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$. В настоящей работе показано, что эта проблема может быть решена путем рационального выбора толщины реакционной наносистемы.

Рассмотренная выше ситуация, когда теплота, переносимая за счет теплопроводности в реакционную смесь перед фронтом горения, приводит к вырождению фронта за счет более медленного реагирования компонентов в

зоне прогрева, хорошо известно для случая обычного газофазного горения. Применительно к SFB такое возможно в случае, когда температура, с помощью которой нужно зажечь горение в новой области, недостаточна. Тогда получается следующее: теплота распространяется вдоль шнура и приводит к образованию тонкой прослойки промежуточных продуктов на границах реагентов (здесь это граница Ni/Al) по механизму твердофазной диффузии при низкой температуре слишком медленно. В результате эти слои будут играть роль реакционного барьера — происходит то, что при обычном SFB иногда называют „отравление шихты“, и SFB становится невозможным.

Рассмотрение в настоящей работе ведется в предположении, что горение прекращается, когда температура в волне горения падает чуть ниже температуры $T_{\text{melt}}(\text{AlNi}) = 1911 \text{ K}$. Но на самом деле для поддержания SFB необходимо наличие расплава, чтобы погасить горение надо снизить температуру до $T < T_{\text{melt}}(\text{Al})$, ведь массоперенос реагентов в расплаве, приводящий к экзотермическому образованию продукта, идет на порядки быстрее, чем в твердых фазах. Все сделанные выше предположения при этом по-прежнему оправданы. Собственно, именно такая физика и заложена в модель (рис. 1).

С другой стороны, проведенные расчеты указывают на возможность экспериментального определения оптимальной температуры $T \approx 1700 \text{ K}$ и оптимального значения $m \approx 2.5$ — безразмерного параметра глубины химического превращения (рис. 2, c). Напомним, что m является единственным используемым при вычислениях подгоночным параметром. Это проливает свет на специфику каждого акта взаимодействия Al и Ni. Можно выделить ячейку с такими размерами, что реакция в ней будет происходить, как в случае гомогенной — объемной реакции, а учет специфики сведется к умножению на некоторую функцию $\varphi(\eta) = \exp(-2.5\eta)$. „Специфика“ теперь сводится к определению глубины химического превращения $0 < \eta < 1$. Обычно выбирают $\eta < 1$.

Наконец, укажем, как теплофизическая ситуация решенной задачи связана с пайкой. В задаче на основе уравнений (7)–(10) рассмотрен шнур из реакционно-способной шихты, который висит в воздухе. Если происходит пайка, для которой надо определить критический диаметр шнура из условия гашения SFB в нем из-за теплопотерь, то нужно рассматривать двумерную задачу — контакт этого шнура с припоем и кондуктивный теплоотвод, сопровождающийся плавлением припоя. Однако на наш взгляд это не изменит ситуацию качественно, хотя и может несколько уменьшить критический диаметр $50 \mu\text{m}$.

Решать такую задачу можно только численно, но это будет необходимо лишь при разработке конкретной технологии.

Благодарности

Благодарим А.В. Архипова за плодотворное обсуждение.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Adams D.P.* // Thin Solid Films. 2015. Vol. 576. P. 98–128.
- [2] *Мержанов А.Г., Мукасян А.С.* Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс, 2007. 336 с.
- [3] *Weihs T.P.* Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils / In: K. Barmak, K. Coffey (Editors). Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2014. P. 160–243.
- [4] *Рогачев А.С.* // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 1. С. 22–38.
- [5] *Khina B.B.* Combustion Synthesis of Advanced Materials. Nova Science Publ., 2010. 110 p.
- [6] *Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Baras F., Politano O., Rouvimov S., Sachkova N.V., Grapes M.D., Weihs T.P., Mukasyan A.S.* // Combustion and Flame. 2016. Vol. 166. P. 158–169.
- [7] *Алдушин А.П., Хайкин Б.Е.* // ФГВ. 1974. № 3. С. 313–323.
- [8] *Salloum M., Knio O.M.* // Combustion and Flame. 2010. Vol. 157. N 2. P. 288–295.
- [9] *Gunduz I.E., Fadenberger K., Kokonou M., Rebholz C., Doumanidis C.C., Ando T.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. N 7. P. 074903 (9 p.).
- [10] *Vohra M., Grapes M., Swaminathan P., Weihs T.P., Knio O.M.* // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. N 12. P. 123521 (8 p.).
- [11] *Helander T., Agren J.* // Acta Mater. 1998. Vol. 47. N 4. P. 1141–1152.
- [12] *Wei H., Sun X., Zheng Q., Guan H., Hu Z.* // Acta Mater. 2004. Vol. 52. N 9. P. 2645–2651.
- [13] *Kvashenkina O.E., Gabdullin P.G., Arkhipov A.V.* SmartFoil: a novel assembly technology for electronic circuit boards in multifunctional units. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018. P. 202–206.
- [14] *Итин В.И., Найбороденко Ю.С.* Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1989. 214 с.
- [15] *Fritz G.M., Grzyb J.A., Knio O.M., Grapes M.D., Weihs T.P.* // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. N 13. P. 135101 (8 p.).
- [16] *Рогачев А.С., Мукасян А.С.* Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. М.: Физматлит, 2012. 400 с.
- [17] *Danzi S., Menetrey M., Wohlwend J., Spolenak R.* // Appl. Mater. Interfaces. 2019. Vol. 11. N 45. P. 42479–42485.