

УДК УДК 536.46+541.124

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ $3\text{Ni} + \text{Al}$

О. В. Лапшин, **В. К. Смоляков**

Томский научный центр СО РАН, ovlap@mail.ru

В макроскопическом приближении построена математическая модель синтеза в механоактивированной системе $3\text{Ni}-\text{Al}$. Установлены различные режимы горения в зависимости от длительности механической активации и времени изотермической выдержки механоактивированной смеси. С использованием экспериментальных данных определены кинетические константы, характеризующие превращение вещества на стадии механической обработки.

Ключевые слова: порошковая смесь, механическая активация, волна горения.

DOI 10.15372/FGV20190112

ВВЕДЕНИЕ

Механическая активация (МА) — эффективный способ управления твердофазными реакциями и их стимулирования [1]. Особый интерес представляет разделение процесса на стадию механической обработки, когда происходит активация смеси, и стадию химического превращения — собственно синтез. Такой двухстадийный процесс эффективен в экзотермических системах для реализации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [2]. Он позволяет расширить номенклатуру синтезируемых в волне горения веществ и снизить требования к исходным компонентам.

На этапе МА исходной смеси могут образовываться продукты — твердые растворы и фазы [3]. В этом случае активированная смесь будет содержать не только исходные компоненты, но и некоторое количество превращенного вещества.

В [4–6] проведены экспериментальные исследования двухстадийного механохимического синтеза интерметаллида Ni_3Al в режимах теплового взрыва и горения. С использованием результатов экспериментов [4] в работе [7] построена математическая модель и определены кинетические и теплофизические константы, характеризующие механохимический синтез интерметаллида Ni_3Al в условиях теплового взрыва, проведены численные расчеты динамики процесса.

В настоящей работе с использованием результатов [7] в макроскопическом приближении [8] построена и исследована математическая модель механохимического синтеза интерметаллида Ni_3Al в режиме горения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Примем следующие упрощения.

1. Конечный продукт Ni_3Al образуется в одностадийной необратимой реакции.

2. Плотности исходной смеси и продукта равны, что позволяет не рассматривать движение вещества.

3. Максимальная температура в волне горения предварительно механоактивированной смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ меньше температур плавления Ni и фазы Ni_3Al [5, 6].

4. Синтез интерметаллида Ni_3Al осуществляется в приближении адиабатического процесса (без учета теплопотерь в окружающую среду).

В этом случае уравнения теплопроводности и химического превращения имеют вид:

$$\begin{aligned} & [\bar{c} + (1 - c_0)L(1 - \alpha)\delta(T - T_L)]\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = [Q + (1 - c_0)Le(T - T_L)]\rho \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \\ & \quad + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(S)f(\alpha)k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2)$$

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 0365-2018-0003).

© Лапшин О. В., Смоляков В. К., 2019.

$$\begin{aligned} \varphi &= (1 - c_0)(1 - \alpha)\varphi_{Al} + c_0(1 - \alpha)\varphi_{Ni} + \alpha_0\varphi_F, \\ \varphi_{Al} &= \varphi_{Al}^0[1 - e(T - T_L)], \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь t — время; x — пространственная координата; T — температура; c_{Ni} , $c_{Al} = c_{Al}^0 + L\delta(T - T_L)$ — теплоемкость Ni и Al (с учетом фазового перехода); c_{Al}^0 — часть теплоемкости Al, не зависящая от фазового перехода; T_L , L — температура и теплота плавления Al; $\bar{c} = (1 - c_0)c_{Al}^0 + c_0c_{Ni}$; c_0 — массовая концентрация Ni в продукте реакции; ρ_{Ni} , ρ_{Al} — плотность Ni и Al; $\rho = c_0\rho_{Ni} + (1 - c_0)\rho_{Al}$ — плотность смеси; Q — тепловой эффект реакции; α — глубина химического превращения, определенная как массовая доля продукта в реагирующей смеси; $\lambda = (1 - c_0)\lambda_{Al} + c_0\lambda_{Ni}$ — коэффициент теплопроводности смеси, алюминия и никеля; φ_{Al} , φ_{Ni} , φ — запасенная избыточная энергия в компонентах Ni, Al и в смеси; соотношение $\varphi_{Al} = \varphi_{Al}^0[1 - e(T - T_L)]$ выражает отсутствие избыточной энергии в расплавленном алюминии; $f(\alpha)$ — кинетический закон; k_0 — предэкспонент; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; $F(S)$ — величина межфазной поверхности;

$$\delta(T - T_L) = \begin{cases} 0, & T \neq T_L, \\ \infty, & T = T_L \end{cases} \quad \text{— } \delta\text{-функция Дирака;}$$

$$e(T - T_L) = \begin{cases} 0, & T < T_L, \\ 1, & T \geq T_L \end{cases} \quad \text{— функция}$$

Хэвисайда. Входящая в \bar{c} величина c_i ($i = Al, Ni$) — средняя теплоемкость компонента, вычисляемая из соотношения

$$c_i = \frac{1}{T_m - T_0} \int_{T_0}^{T_m} c_i(T) dT.$$

Влияние запасенной в реагентах избыточной энергии на энергию активации химической реакции определяется соотношением [8]

$$E = E_0 - \varphi_\Sigma,$$

E_0 — энергия активации в начальный момент МА, $\varphi_\Sigma = c_0\varphi_{Ni} + (1 - c_0)\varphi_{Al}^0$ — суммарная избыточная энергия, запасенная в твердых реагентах на стадии МА.

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$t = 0: \quad T(x) = T_0, \quad \alpha(x) = \alpha_0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x = 0: \quad T &= T_w(t < t_w), \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (t \geq t_w), \\ x = +\infty: \quad T &= T_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь T_0 — начальная температура смеси; T_w , t_w — температура накаливаемой стенки и время ее соприкосновения с образцом; α_0 — начальная глубина химического превращения в порошковой смеси после МА.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Не умаляя общности дальнейшего анализа, дополнительно примем следующие допущения.

5. Синтез интерметаллида Ni_3Al контролируется диффузией реагентов через слой продукта, поэтому кинетическая функция имеет вид $f(\alpha) = 1/\alpha$.

6. Согласно [9, 10] при МА в смеси никеля с алюминием отдельные частицы реагентов не обнаруживаются уже после 30 с механообработки. В процессе МА они формируют микрокомпозиаты — слоистые образования из никеля и алюминия с высокоразвитой межфазной поверхностью. Поэтому полагаем, что в начальный момент времени МА порошковая смесь алюминия с никелем состоит из эквивалентных частиц-механокомпозиатов, в которых состав компонентов соответствует стехиометрическому составу смеси.

7. Межфазная реакционная поверхность после МА вычисляется из следующего приближенного соотношения [7]:

$$F(S) = K\mu_{0Ni}\mu_{0Al}t_a^2/2, \quad (6)$$

где K — коэффициент агломерации сходных частиц реагентов в механокомпозиаты; μ_{0Ni} , μ_{0Al} — исходная объемная доля реагентов Ni и Al в смеси; t_a — время предварительной механической активации смеси. Уравнение (6) выполняется только для механоактивированной смеси ($t_a > 0$). В неактивированной смеси вследствие незначительности исходной межфазной поверхности активное химическое взаимодействие начинается после появления расплава.

8. Известно, что в большинстве случаев металлических систем предварительная механическая обработка может сопровождаться механохимическим превращением [11] и, как

следствие, образованием интерметаллических фаз в механоактивируемой порошковой смеси [12]. Будем полагать, что в первом приближении скорость химического превращения на стадии МА пропорциональна величине межфазной поверхности:

$$\frac{d\alpha_0}{dt} = m(T)F(S), \quad (7)$$

где $m(T)$ — коэффициент, в общем случае зависящий от температуры в механоактиваторе.

Интегрируя (7) с использованием (6), для изотермического процесса получаем глубину превращения после этапа МА:

$$\alpha_0 = Mt_a^3 + B, \quad (8)$$

где $M = m(T_0)K\mu_{0Ni}\mu_{0Al}/6$, B — константа.

Пренебрегая релаксацией избыточной энергии в реагентах на стадии МА, а также различием ее значений в Ni и Al, запишем следующее соотношение:

$$\varphi_{Al} = \varphi_{Ni} = \varphi_0 = It_a, \quad (9)$$

где I — константа скорости накопления избыточной энергии в реагентах. Скорость накопления избыточной энергии в сформировавшемся на стадии МА продукте в пренебрежении ее релаксацией можно представить в виде [8]

$$\frac{d\varphi_f}{dt} = I - \frac{\varphi_f}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt}, \quad t \leq t_a.$$

Следует принимать во внимание, что в общем случае между стадиями активации и синтеза существует временной интервал, величина которого — дополнительный параметр управления двухстадийным синтезом. Поэтому в экспериментальной практике необходимо строго фиксировать интервал времени между окончанием первого и началом второго этапа, так как в этот период происходит нормализация структуры (возврат). Во время выдержки механоактивированной порошковой смеси имеет место релаксация избыточной энергии, а также возможно дополнительное химическое превращение. В [13] приведено соотношение для оценки величины избыточной энергии к началу этапа синтеза:

$$\varphi_0^* = \varphi_0 - \Delta\varphi, \quad (10)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_0 \left\{ 1 - \frac{RT_0 \exp(-G\tau)}{RT_0 + \varphi_0[1 - \exp(-G\tau)]} \right\}$, $G = g \exp(-U/RT_0)$, U — энергия активации релаксации избыточной энергии, g — предэкспоненциальный множитель, τ — время выдержки механоактивированной смеси при температуре T_0 .

Глубину химического превращения к началу синтеза будем определять по формуле

$$\alpha_0^* = \alpha_0 + \Delta\alpha. \quad (11)$$

Интегрируя (2) в пренебрежении торможением продуктами реакции, в конечном итоге запишем

$$\Delta\alpha \approx F(S)k_0 \int_0^\tau \exp\left(-\frac{E_0 - \varphi}{RT_0}\right) dt.$$

Без учета поправок (10), (11) вклад запасенной избыточной энергии в общий тепловой эффект реакции, а также глубина химического превращения к началу этапа синтеза будут иметь смысл верхней и нижней оценок соответственно.

Интегрируя (1), с учетом (9) для максимальной температуры T_m в волне горения получаем соотношение

$$T_m \approx T_0 + (1 - \alpha_0) \left(\frac{Q}{\bar{c}} + \frac{I}{\bar{c}} t_a \right). \quad (12)$$

Формула (12) записана без учета вклада теплоты от отжига структурных несовершенств в продукте (φ_f/\bar{c}) в общий тепловой эффект реакции синтеза. Этой величиной можно пренебречь в случае $\varphi_f/\bar{c} < \alpha_0 I t_a$.

Значения исходных параметров для расчетов [7, 14, 15]: $c_{Ni} = 440$ Дж/(кг·К), $c_{Al}^0 = 903$ Дж/(кг·К), $\bar{c} = 695.8$ Дж/(кг·К), $\lambda_{Ni} = 90.9$ Дж/(м·К·с), $\lambda_{Al} = 237$ Дж/(м·К·с), $\lambda = 109.84$ Дж/(м·К·с), $\rho_{Ni} = 8900$ кг/м³, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³, $T_L = 933.5$ К, $Q = 7.6 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L = 3.9 \cdot 10^5$ Дж/кг, $I = 539$ Дж/(кг·с), $Kk_0 = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-3}$, $E_0 = 52593$ Дж/моль, $\mu_{0Al} = 0.33$, $\mu_{0Ni} = 0.67$, $c_0 = 0.87$, $T_0 = 300$ К. Отметим, что полученное в [7] значение энергии активации E_0 меньше определенного в случае химического взаимодействия в неактивированных составах. Основная причина этого — очищение в условиях МА поверхности порошков от примесных пленок и образование микрокомпозитов, имеющих чистую межфазную поверхность. Определенные в [7] на основании экспериментальных

данных [4] величины I и Kk_0 были рассчитаны для планетарной шаровой мельницы мощностью $W = 40\text{g}$. Полагая, что константы механоактивации K и I зависят от мощности мельницы линейным образом [8], в дальнейшем параметры I и Kk_0 для механоактиватора произвольной мощности W (при условии одинаковой массы порошковой загрузки) будем оценивать по следующим формулам:

$$I(W) = I(40)\frac{W}{40}, Kk_0(W) = Kk_0(40)\frac{W}{40}. \quad (13)$$

Параметры M и B вычислялись на основе данных экспериментов [5, 6] методом наименьших квадратов в координатах прямой (t_a^3, α_0) по формуле (8), в которой начальное превращение вещества находили с использованием экспериментальных результатов из соотношения

$$\alpha_0 = 1 - \frac{\bar{c}(T_m - T_0)}{Q + It_a}$$

На рис. 1 в координатах (t_a^3, α_0) представлены результаты обработки методом наименьших квадратов экспериментальных данных [5, 6] соответственно при $W = 40\text{g}$ и 60g с использованием уравнения прямой (8). Установлено, что в диапазоне времени механоактивации $30 \div 210\text{c}$ зависимость $\alpha_0(t_a)$ хорошо аппроксимируется уравнением (8). Значение параметра M находили по тангенсу угла наклона прямой с осью

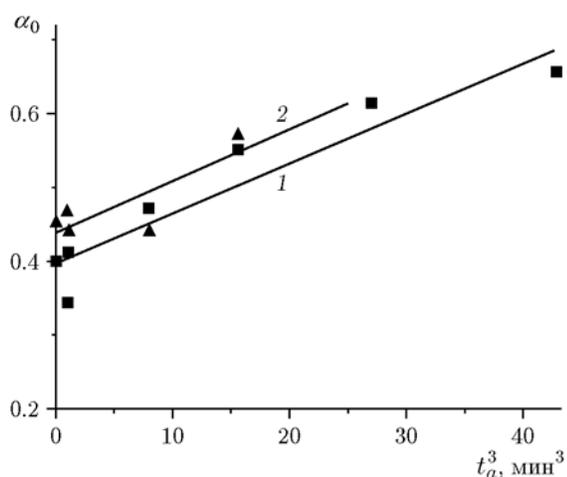


Рис. 1. Определение параметров M и B по результатам обработки экспериментальных данных механохимического синтеза смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ из работ [5] (линия 1) и [6] (линия 2) при мощности мельницы соответственно 40g (квадраты, 1) и 60g (треугольники, 2)

абсцисс, величину B вычисляли в точке пересечения прямой с осью ординат. Примечательно, что полученные значения M и B при разных мощностях мельницы отличаются незначительно: $M = 0.006\text{ мин}^{-3}$, $B = 0.404$ в случае $W = 40\text{g}$, $M = 0.0068\text{ мин}^{-3}$, $B = 0.44$ при $W = 60\text{g}$.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Система уравнений (1)–(3) с дополнительными соотношениями (6)–(9), (7), начальными и граничными условиями (4), (5) решалась с использованием неявной разностной схемы методом прогонки.

Изменение площади межфазной поверхности в порошковой смеси $k_0F(S)$, доли запасенной избыточной энергии в реагентах φ_0 и количества превращенного вещества α_0 в исходной порошковой смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ в зависимости от времени предварительной МА иллюстрирует рис. 2. Видно, что с ростом времени механообработки вследствие измельчения и агломерации компонентов в механокомпозиаты, создания высокодефектной структуры в них, а также фазообразования в результате химического превращения все три параметра увеличиваются.

Влияние времени механоактивации на температуру T_m и скорость горения u без учета и с учетом химического превращения на этапе МА в механоактиваторе мощностью $W = 40\text{g}$ и 60g демонстрирует рис. 3.

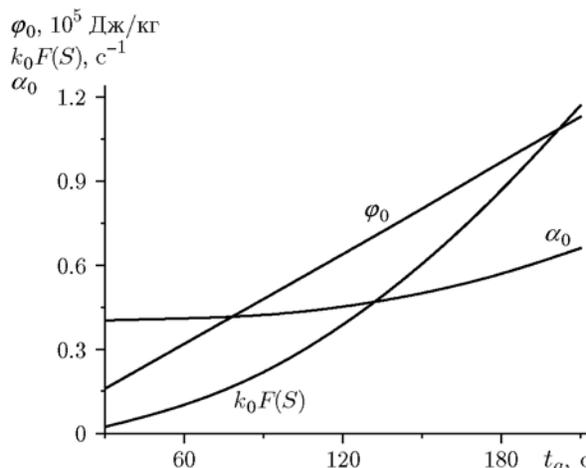


Рис. 2. Зависимости параметра $k_0F(S)$, запасенной избыточной энергии φ_0 и начальной глубины превращения α_0 в порошковой смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ от времени МА при $W = 40\text{g}$

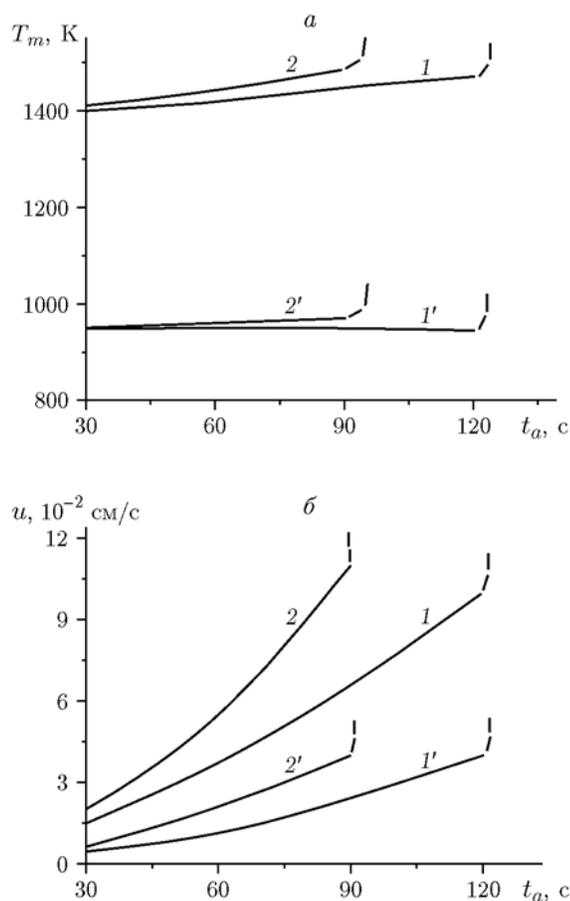


Рис. 3. Зависимости максимальной температуры синтеза (а) и скорости горения (б) от времени механической активации без учета (кривые 1, 2) и с учетом (кривые 1', 2') химического превращения на этапе МА при мощности мельницы 40g (1, 1') и 60g (2, 2')

Существенное отличие теоретически рассчитанной скорости горения ($0.025 \div 0.12$ см/с) от найденной экспериментально ($0.1 \div 1.4$ см/с [5, 6]) можно объяснить двумя причинами. Первая — это погрешность определения методом обратной задачи параметров Kk_0 и I , заметно влияющая на вычисление скорости u . В [7] эти параметры находили методом спрямления экспериментальных данных в логарифмических координатах. В таком случае при использовании Kk_0 и I в прямых расчетах погрешность вычисления характеристик механосинтеза может возрасти экспоненциально. К тому же в настоящей работе в случае $W = 60$ g применялось аппроксимационное приближение (13).

Второй причиной несовпадения теоретической и экспериментальной скоростей горения

может быть отличие характеристик применяемых в экспериментах [4] и [5, 6] веществ и их физико-химического состояния: параметры механоактивации Kk_0 и I находили с использованием результатов экспериментов [4], а численные расчеты сравнивали с данными экспериментов [5, 6].

Представленные на рис. 3 расчеты показывают, что с ростом времени предварительной МА происходит увеличение как температуры, так и скорости горения. Причем с продлением МА стационарный режим горения, вследствие снижения величины активационного барьера за счет запасенной в реагентах избыточной энергии, вырождается (предел горения выделен направленным вверх штриховым отрезком). В этом случае инициирование реакции осуществляется в приближении объемного режима синтеза, за счет прогрева широкой области реагирующего образца.

Отметим, что с повышением мощности механоактиватора наблюдается некоторое увеличение температуры синтеза, а вырождение режима горения наступает при меньших значениях t_a . Учет в математической модели химического превращения во время МА уменьшает температуру и скорость горения смеси, что обусловлено снижением ее калорийности.

Еще одним параметром, с помощью которого можно регулировать процесс механохимического синтеза, является период выдержки τ между окончанием предварительной механоактивации смеси реагентов и началом инициирования в ней экзотермической реакции. Оценим влияние длительности выдержки механоактивированной смеси при начальной температуре на параметры горения. Будем считать, что в период «отдыха» происходит релаксация части избыточной энергии в компонентах. В этом случае величина избыточной энергии в механоактивированной смеси, после частичной нормализации ее структуры, к моменту инициирования в ней синтеза будет определяться соотношением (10). Так как входящие в (10) константы U и g неизвестны, будем полагать, что в некоторые моменты изотермической выдержки ($\tau_1 = 0, \tau_2, \tau_3, \tau_4$) запасенная избыточная энергия в реакционной смеси к началу ее синтеза составляет $\varphi_0^* = \varphi_0, \varphi_0^* = \varphi_0/2, \varphi_0^* = \varphi_0/3$ и $\varphi_0^* \approx 0$ соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости T_m и u от длительности МА при различных временах изотермической выдержки механоактиви-

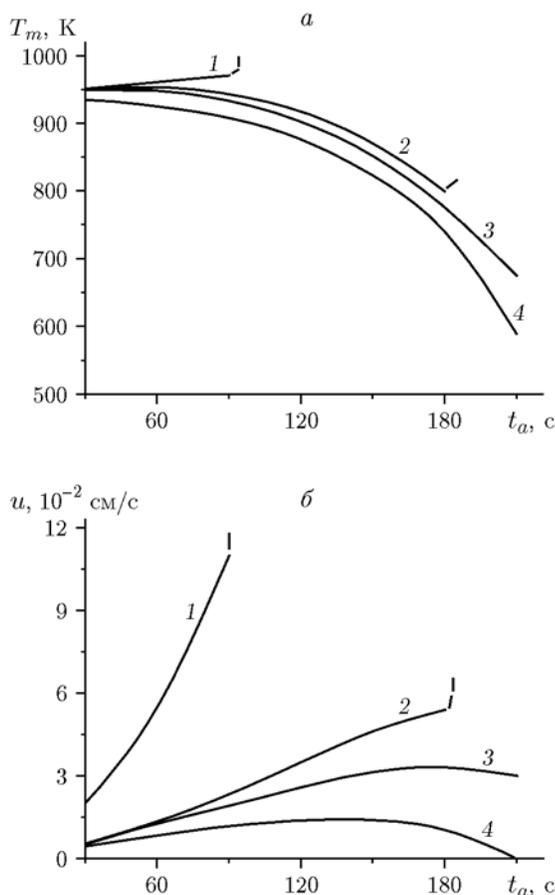


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры синтеза (а) и скорости горения (б) от времени механической активации без учета и с учетом образования продуктов на этапе МА при $W = 60\text{g}$ и различных временах изотермической выдержки механоактивированной смеси:

1 — $\tau = \tau_1 = 0$ ($\varphi_0^* = \varphi_0$), 2 — $\tau = \tau_2$ ($\varphi_0^* = \varphi_0/2$),
 3 — $\tau = \tau_3$ ($\varphi_0^* = \varphi_0/3$), 4 — $\tau = \tau_4$ ($\varphi_0^* \approx 0$)

рованной смеси: $\tau = \tau_1 = 0$ ($\varphi_0^* = \varphi_0$), $\tau = \tau_2$ ($\varphi_0^* = \varphi_0/2$), $\tau = \tau_3$ ($\varphi_0^* = \varphi_0/3$), $\tau = \tau_4$ ($\varphi_0^* \approx 0$). Как показывает рисунок, без учета времени выдержки механоактивированной смеси длительность МА растет с увеличением скорости горения (линия 1). Относительно небольшой временной интервал «отдыха» смеси между этапами МА и последующего синтеза неоднозначно влияет на параметры горения: происходит увеличение скорости горения с ростом t_a , а на кривой $T_m(t_a)$ присутствует слабо выраженный максимум, обусловленный конкуренцией процессов накопления избыточной энергии и «отравления» реакционной смеси продуктами химической реакции на этапе МА

(кривая 2).

При более длительном периоде «отдыха» механоактивированной смеси и нормализации ее структуры (кривые 3 и 4 на рис. 4) функция $T_m(t_a)$ является убывающей, а зависимость $u(t_a)$ носит немонотонный характер — имеется максимум, наличие которого можно объяснить следующими причинами. Вначале продолжительность МА способствует образованию более высокодефектной структуры в компонентах и развитой межфазной поверхности, повышает реакционную способность смеси, увеличивая тем самым скорость горения. На более поздних этапах МА преобладающим фактором, определяющим синтез интерметаллида, становится его пассивация продуктами химического превращения, образовавшимися в результате предварительной механообработки порошковой смеси. В этом случае скорость горения снижается.

Отметим также, что с увеличением времени выдержки τ переход от стационарного режима горения к вырожденному осуществляется в более позднее время МА (кривые 1 и 2 на рис. 4). Однако в случае практически полной нормализации структуры смеси ($\tau = \tau_4$) по мере увеличения времени МА горение затухает (кривая 4). Полученные результаты удовлетворительно соответствуют данным экспериментов [5, 6].

На рис. 5 представлены типичные структуры волны синтеза интерметаллида Ni_3Al без учета и с учетом химического превращения на стадии МА при $W = 40\text{g}$ и $t_a = 105\text{ s}$. Видно, что в результате химической реакции происходит интенсивный рост температуры (линия 1) и глубины химического превращения (2) на фоне уменьшения запасенной ранее избыточной энергии (3).

Без учета в математической модели химического превращения на стадии МА влияние фазового перехода на динамику химического превращения проявляется в резком уменьшении избыточной энергии при температуре T_L . На термограмме в точке фазового перехода характерный перегиб, связанный с плавлением алюминия, практически незаметен, по видимому, в силу малости параметра $(1 - c_0)L/Q = 0.067 \ll 1$.

При учете химического превращения на этапе МА (б) тепловой эффект реакции и максимальная температура синтеза уменьшаются. Последнее способствует переводу реакции горе-

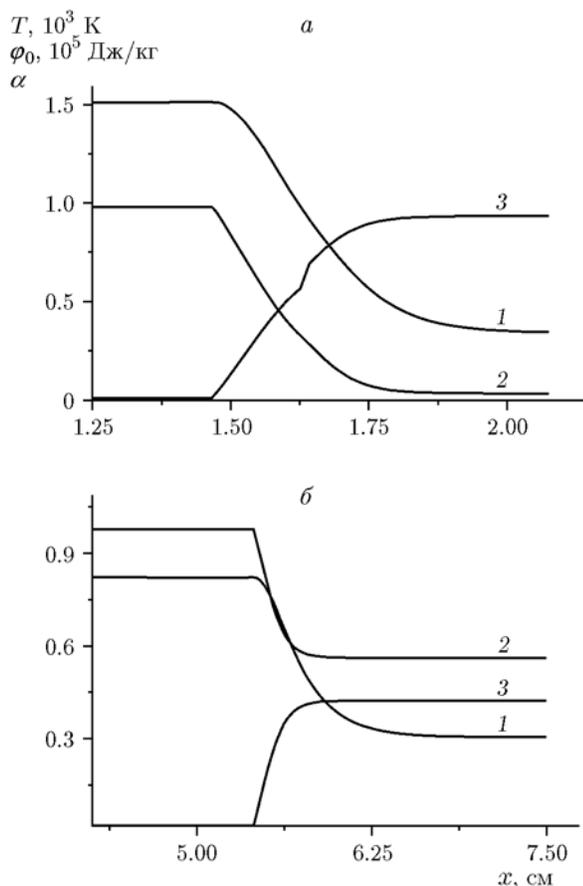


Рис. 5. Структура волны горения без учета (а) и с учетом (б) образования продуктов на этапе МА:

1 — температура, 2 — глубина химического превращения, 3 — избыточная энергия при $W = 40\text{ г}$ и $t_a = 105\text{ с}$

ния в твердофазный режим (ниже температуры плавления алюминия).

Полученный результат подтверждает возможность проведения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в предварительно механоактивированной смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ в режиме истинно твердофазного горения, ранее экспериментально установленного в [5, 6]. Отметим, что при тепловом взрыве в механоактивированных составах $3\text{Ni} + \text{Al}$ истинно твердофазный режим синтеза интерметаллида реализовать не удастся, о чем свидетельствуют результаты экспериментов [4] и расчетов [7]: в этом случае химическое превращение осуществляется с участием жидкой фазы. Наряду с принципиальными отличиями, данные режимы (послойное горение и тепловой взрыв) имеют общую закономерность, обуслов-

ленную снижением максимальной температуры реакции с продлением времени предварительной МА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В макроскопическом приближении разработана математическая модель волнового синтеза в механически активированной системе $3\text{Ni}-\text{Al}$. Используемый для анализа механохимических процессов макроскопический подход позволяет определить все искомые физико-химические характеристики и параметры модели [8].

Показано, что без учета химического превращения на этапе предварительной МА с ростом времени механической активации увеличиваются температура и скорость горения. Синтез интерметаллида проходит в присутствии жидкой фазы.

Химическое превращение на этапе МА снижает максимальную температуру синтеза, уменьшает скорость горения и переводит химическое взаимодействие в твердофазный режим.

Численные расчеты на качественном уровне коррелируют с результатами экспериментов [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бутягин Ю. П.** Проблемы и перспективы развития механохимии твердых веществ // *Успехи химии*. — 1994. — Т. 63, № 12. — С. 1031–1043.
2. **Мержанов А. Г.** Твердопламенное горение. — Черноголовка: ИСМАН, 2000.
3. **Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий** / под ред. Е. Г. Авакумова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
4. **Корчагин М. А.** Тепловой взрыв в механически активированных низкокалорийных составах // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 77–86.
5. **Корчагин М. А., Григорьева Т. Ф., Бохонов Б. Б., Шарафутдинов М. Р., Барина А. П., Ляхов Н. З.** Твердофазный режим горения в механически активированных СВС-системах. I. Влияние продолжительности механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения // *Физика горения и взрыва*. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 51–59.
6. **Корчагин М. А., Григорьева Т. Ф., Бохонов Б. Б., Шарафутдинов М. Р., Барина А. П., Ляхов Н. З.** Твердофазный режим горения механически активированных

- СВС-системах. II. Влияние режимов механической активации на характеристики процесса и состав продуктов горения // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 60–68.
7. **Лапшин О. В., Смоляков В. К.** Моделирование теплового взрыва предварительно активированной смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 5. — С. 64–69.
 8. **Смоляков В. К., Лапшин О. В.** Макроскопическая кинетика механохимического синтеза. — Томск: ИОА СО РАН, 2011.
 9. **Корчагин М. А., Филимонов В. Ю., Смирнов Е. В., Ляхов Н. З.** Тепловой взрыв механически активированной смеси $3\text{Ni} + \text{Al}$ // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 48–53.
 10. **Korchagin M. A., Filimonov V. Yu., Smirnov E. V., Lyakhov N. Z.** Thermal explosion in mechanoactivated $3\text{Ni} + \text{Al}$ mixtures // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2009. — V. 18, N 2. — P. 133–136.
 11. **Механохимический** синтез в неорганической химии: сб. науч. тр. /под ред. Е. Г. Авакумова. — Новосибирск: Наука, 1991.
 12. **Григорьева Т. Ф., Барина А. П., Ляхов Н. З.** Начальные стадии механического сплавления в металлических системах с легкоплавким компонентом // Докл. АН. — 2002. — Т. 385, № 6. — С. 774–776.
 13. **Смоляков В. К., Лапшин О. В., Болдырев В. В.** Динамика неизотермического механохимического синтеза в гетерогенных системах // Теор. основы хим. технологии. — 2008. — Т. 42, № 2. — С. 1–10.
 14. **Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.** Физические величины: справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
 15. **Смитлз К. Дж.** Металлы: справочник. — М.: Металлургия, 1980.

*Поступила в редакцию 24/X 2017 г.,
в окончательном варианте — 6/III 2018 г.*
