

УДК 536.46

ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛНЫ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПЕРФОРИРОВАННУЮ ПРЕГРАДУ

Р. М. Габбасов¹, В. Д. Китлер¹, В. Г. Прокофьев^{1,2}, А. М. Шульпеков¹

¹Томский научный центр СО РАН, 634021 Томск, pvg@ftf.tsu.ru

²Томский государственный университет, 634050 Томск

Экспериментально и теоретически рассмотрены особенности распространения волны высокотемпературного синтеза через перфорированную металлическую пластину, установленную внутри образца цилиндрической формы, сформированного из порошковой смеси $Ni + Al$. Использовались два типа пластин различной толщины: медные и стальные. Исследованы закономерности прохождения фронта экзотермической реакции через отверстие в преграде в зависимости от теплофизических характеристик пластины и геометрических размеров отверстия. В зависимости от параметров пластины определен критический диаметр отверстия, минимально необходимый для распространения волны горения по образцу.

Ключевые слова: СВС, фронт реакции, скорость горения, критический диаметр.

DOI 10.15372/FGV20220603

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач современного материаловедения является получение интерметаллических соединений и создание на их основе композиционных материалов с особым комплексом свойств. В настоящее время широкое распространение получил самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) интерметаллических и других соединений [1], технологической основой которого является проведение гетерогенных реакций синтеза в экзотермически реагирующих мелкодисперсных порошковых смесях. Развитие теории и практики синтеза композиционных и функционально-градиентных материалов тесно связано с порошковой металлургией. Основная проблема здесь заключается в формировании качественного контакта металлических порошков и монолитных металлов с целью создания благоприятных условий для синтеза структурно-неоднородных материалов и соединений. Для решения этой задачи применяются методы высокотемпературного синтеза смесей под действием центробежных сил [2–5], силового компактирования продуктов синтеза [6–8],

на некоторых этапах используются технологии механосинтеза [9–11]. Следует заметить, что все указанные процессы требуют значительных энергозатрат.

С другой стороны, горение различных конденсированных топлив в области контакта с металлическими включениями имеет ряд характерных особенностей. Так, введение в конденсированный состав теплопроводящих элементов в виде пластин или проволочек может приводить к значительному увеличению скорости горения заряда [12, 13]. Аналогичное включение теплопроводящих элементов в безгазовый состав также влияет на скорость [14] и изменение режима [15] горения цилиндрического образца. Обратный эффект возникает при тепловом взаимодействии (контакте) волны горения с массивной металлической подложкой — «замораживание» зоны горения с недогоранием слоя пороха некоторой толщины [16, 17]. Толщина несгоревшего слоя уменьшается с увеличением начальной температуры и давления газа в окружающем заряд пространстве. Увеличение теплопроводности подложки приводит к возрастанию теплоотвода из зоны горения и к более значительному снижению скорости горения, что проявляется в увеличении толщины несгоревшего слоя топлива [17]. В [18] представлены результаты экспериментального исследования горения пороха Н с целью определения критического диаметра при различном давлении окружающей среды. Значение кри-

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ТНЦ СО РАН при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00081).

© Габбасов Р. М., Китлер В. Д., Прокофьев В. Г., Шульпеков А. М., 2022.

тического диаметра цилиндрического образца пороха, заключенного в массивную алюминиевую обойму, при атмосферном давлении составило 3 мм. В [19, 20] для ряда интерметаллидных систем приведен диапазон значений критического диаметра образцов цилиндрической формы $0.003 \div 0.006$ м, при которых происходит погасание. Обнаружено, что критический диаметр существенно зависит от пористости и дисперсности порошков. При его значениях больше 0.02 м температура и скорость горения образцов не зависят от диаметра. В работах [21, 22] рассматривались особенности перехода волны горения в конденсированной среде через сплошную инертную преграду определенной толщины в зависимости от ее конфигурации и теплофизических свойств. Характеристики преграды определяли критические условия перехода через нее волны горения.

Теплоотвод из зоны горения газового и конденсированного топлива через стенки реактора в окружающую среду приводит к фундаментальному в теории горения понятию критического (гасящего) диаметра [23–25].

В настоящей работе экспериментально и теоретически рассмотрены закономерности перехода безгазовой волны горения в цилиндрическом образце, сформированном из порошковой смеси Ni + Al, через перфорированную металлическую пластину (медь, сталь).

Целью работы являлось определение критического диаметра отверстия в зависимости от толщины и теплофизических свойств материала преграды.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментального согласования с математической моделью выбрана хорошо изученная безгазовая система Ni—Al. Массовый состав исходной смеси 80 % Ni + 20 % Al выбран исходя из того, что при составе 69 % Ni + 31 % Al и толщине преграды 2 мм волна горения, как показано нами в [26], проходит даже через сплошную преграду без отверстия. Использовались порошки никеля марки УТ4 (содержание Ni 99.9 %, размер частиц $d < 20$ мкм), алюминия марки АСД-4 (содержание Al 99.7 %, $d < 15$ мкм).

Смесь готовили путем перемешивания исходных порошков в шаровом смесителе. Образцы получали в пресс-форме диаметром 20 мм следующим образом: 1) насыпали часть исходной смеси; 2) помещали металлический диск

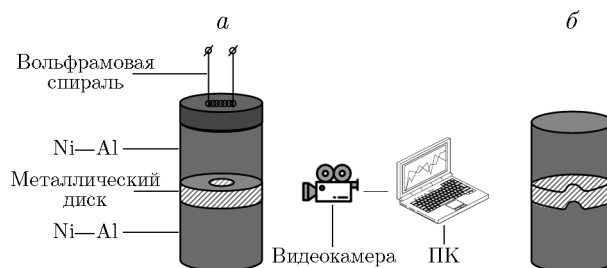


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

(медь или сталь) толщиной $2 \div 6$ мм с отверстием в центре для определения критического диаметра (рис. 1, а) или с краем для визуализации прохождения волны горения через отверстие (рис. 1, б); 3) насыпали часть исходной смеси. Подготовленный трехслойный пакет прессовали до относительной плотности ≈ 0.5 .

Синтез проводили в реакторе в среде аргона при атмосферном давлении и температуре окружающей среды 298 К. Образец устанавливали в реакторе вертикально. В качестве поджигающей таблетки использовали смесь порошков титана (70 %) и бора (30 %), инициирование осуществляли электрической спиралью.

Термопарные измерения выполняли с помощью вольфрам-рениевых термопар BP5/BP20, размещаемых в нижней части образца. Термограммы записывали с помощью АЦП LA20USB (ЗАО «Руднев — Шилиев», г. Москва) на персональный компьютер.

Для визуализации прохождения волны горения через отверстие в преграде и определения ее скорости использовали высокоскоростную видекамеру Motion ProX-3 (Imaging Solutions GmbH, Германия) с частотой кадров 1000 с^{-1} .

С целью согласования экспериментальных и расчетных данных определены максимальная температура горения смеси (1623 К) и скорость распространения фронта (46 мм/с) до момента теплового контакта с преградой.

Для определения критического диаметра отверстия в зависимости от толщины и теплофизических свойств материала преграды проведена серия экспериментов со стальной и медной преградами толщиной 2 и 6 мм с отверстиями диаметром $2.5 \div 4$ мм.

Как показала видеосъемка, скорость распространения волны горения вдоль оси образца резко падает при входе в отверстие преграды в результате отвода тепла в пластину, затем продолжает монотонно уменьшаться при

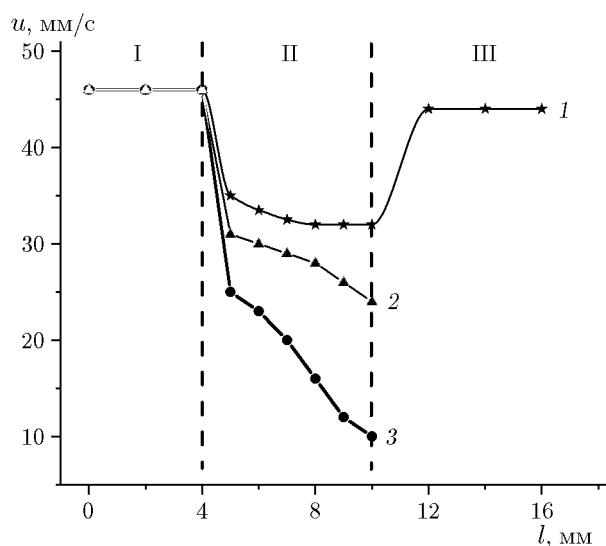


Рис. 2. Скорость волны горения вдоль образца: области образца: I — до преграды, II — отверстие в преграде, III — после преграды; диаметр отверстия в преграде: 1 — 4 мм, 2 — 3.5 мм, 3 — 3 мм; медная пластина толщиной $h = 6$ мм

прохождении канала. При диаметре отверстий 3.5 мм в медной преграде и 3 мм в стальной фронт горения останавливается при прохождении через канал преграды. При диаметре отверстий 4 мм (медь) и 3.5 мм (сталь) фронт горения распространяется за преградой. Зависимости текущей скорости горения от координаты вдоль образца с медной преградой толщиной 6 мм представлены на рис. 2. При диаметре отверстий в преграде 2.5 мм фронт горения останавливается внутри отверстия в экспериментах как с медной, так и со стальной пластиной.

Видеосъемка прохождения волны горения показывает, что форма фронтальной поверхности на выходе зоны горения из отверстия в преграде имеет грибообразную форму. Кадры видеосъемки прохождения волны горения по образцу с медной преградой толщиной 2 мм и диаметром отверстия 4 мм в различные моменты времени представлены на рис. 3. Вследствие интенсивного теплообмена в канале пластины происходит падение температуры, наиболее заметное по утончению светящейся зоны в центре (рис. 3,б). К этому моменту уже формируется волна горения в части образца за пределами пластины.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В двумерной осесимметричной постановке рассматривается горение цилиндрического образца безгазового состава с расположенной внутри него поперечной металлической пластиной, имеющей отверстие. Схема образца представлена на рис. 4. Зажигание осуществляется в результате кратковременного контакта с накаливаемой поверхностью с торца образца в плоскости $x = 0$. На противоположной торцевой поверхности $x = L$ задается теплообмен по закону Ньютона. С учетом симметрии образца на оси $r = 0$ тепловой поток принимается равным нулю, а на внешней поверхности $r = R_2$ теплообмен протекает по закону Ньютона.

Математическая модель в двумерной постановке включает в себя следующие уравнения:

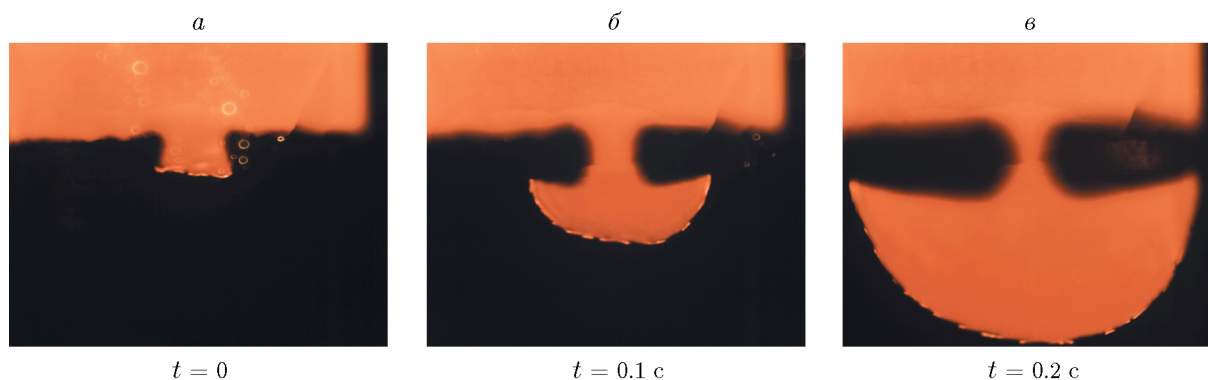


Рис. 3. Кадры видеосъемки процесса горения в образце с медным диском и диаметром отверстия 4 мм в различные моменты времени относительно момента выхода волны из отверстия

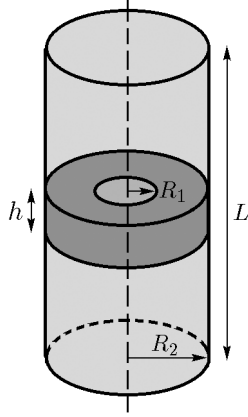


Рис. 4. Схема образца в численных расчетах

— уравнение теплопроводности реагирующей смеси Ni + Al:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_1 r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + Q \rho_1 W(\eta, T_1), \quad (1)$$

— уравнение теплопроводности металлической пластины:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2 r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad (2)$$

— уравнение химического превращения слоя реагирующей смеси Ni + Al:

$$\frac{d\eta}{dt} = W(\eta, T_1), \quad (3)$$

$$W(\eta, T_1) = \begin{cases} (1 - \eta) k_0 e^{-E/RT_1}, & T_1 \geq T_k, \\ 0, & T_1 < T_k. \end{cases}$$

Начальные и граничные условия:

$$x = 0: \quad T_1(0, r, t) = T_w \quad (t < t_w),$$

$$\frac{\partial T_1(0, r, t)}{\partial x} = 0 \quad (t > t_w),$$

$$x = L: \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(L, r, t)}{\partial x} - \alpha(T_0 - T_1(L, r, t)) = 0,$$

$$r = 0: \quad \frac{\partial T_1(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

$$r = R_2: \quad \lambda_i \frac{\partial T_i(x, R_2, t)}{\partial r} - \alpha(T_0 - T_i(x, R_2, t)) = 0,$$

$$x = \frac{L \pm h}{2}: \quad T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \quad (R_1 < r < R_2),$$

$$r = R_1: \quad T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \quad \left(\frac{L - h}{2} < x < \frac{L + h}{2} \right),$$

$$t = 0: \quad T_i = T_0, \quad \eta = 0.$$

Здесь L , R_2 — размеры образца; h — толщина металлической пластины; R_1 — радиус отверстия в пластине; T_1 , T_2 — текущая температура смеси Ni + Al и пластины соответственно; T_0 — начальная температура; T_k — температура обращения в нуль («обрезки») скорости химической реакции; t — время; k_0 , E — предэкспонент и энергия активации химической реакции; Q — тепловой эффект реакции; R — газовая постоянная; η — глубина превращения; λ_i , ρ_i , c_i — теплопроводность, плотность и теплоемкость материалов.

Значения термокинетических констант для смеси Ni + Al взяты из работы [27]: $E = 115$ кДж/моль, $Q = 790$ кДж/кг, $\lambda_1 = 9$ Вт/(м·К), $\rho_1 = 3500$ кг/м³, $c_1 = 598$ Дж/(кг·К), $\lambda_2(\text{Cu}) = 400$ Вт/(м·К), $\rho_2(\text{Cu}) = 8900$ кг/м³, $c_2(\text{Cu}) = 380$ Дж/(кг·К), $\lambda_2(\text{сталь}) = 55$ Вт/(м·К), $\rho_2(\text{сталь}) = 7850$ кг/м³, $c_2(\text{сталь}) = 480$ Дж/(кг·К). Коэффициент теплоотдачи от образца в окружающую среду — $\alpha = 7.9$ Вт/(м²·К). Начальная температура принята равной $T_0 = 298$ К, температура «обрезки» (плавление алюминия) — $T_k = 900$ К, температура нагретой поверхности — $T_w = 1623$ К. Значение предэкспонента $k_0 = 7.1 \cdot 10^6$ с⁻¹ подобрано таким образом, чтобы рассчитываемая средняя скорость горения системы 80 % Ni + 20 % Al соответствовала экспериментально регистрируемой скорости горения смеси Ni + Al без металлической вставки 46 мм/с. Длительность теплового импульса от внешнего источника равна $t_w = 0.75$ с. Численное решение задачи (1)–(4) получено методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы и со

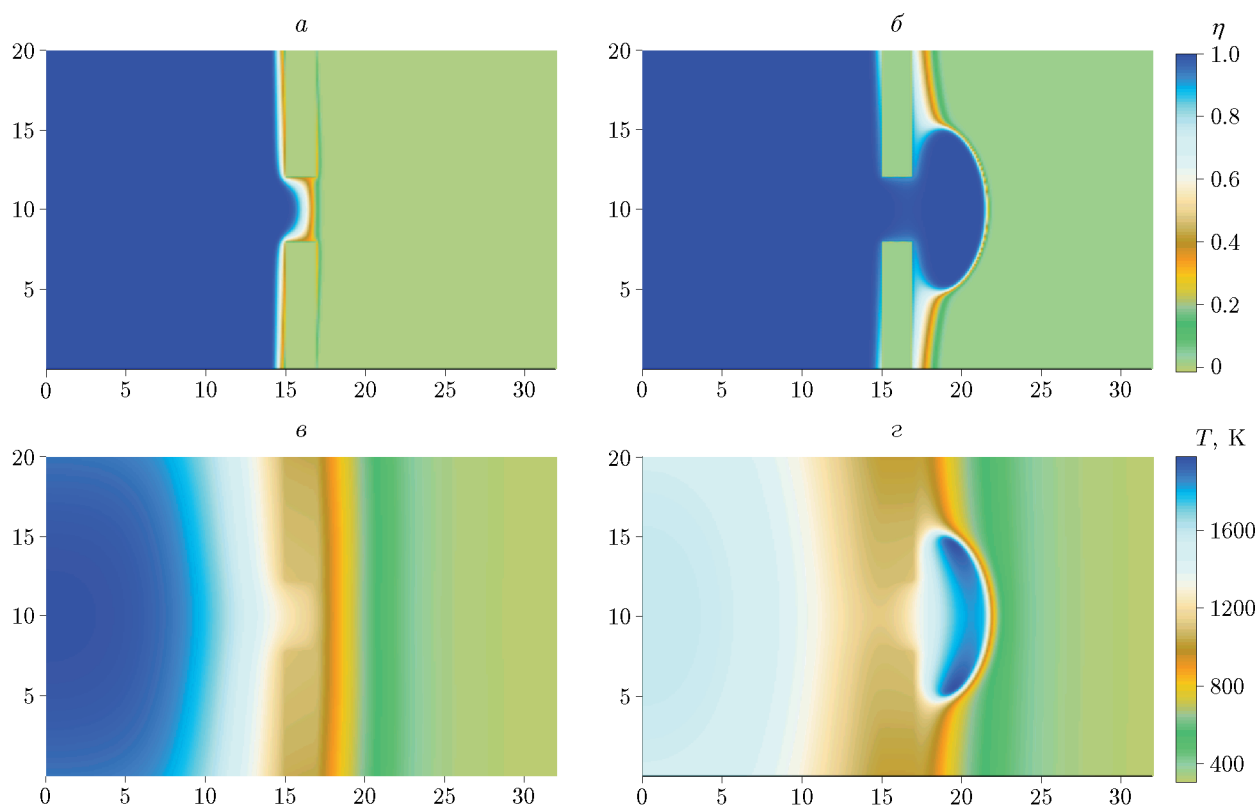


Рис. 5. Поля концентраций (*a*, *б*) и температур (*в*, *г*) образца с медной пластиной толщиной $h = 2$ мм и диаметром отверстия в пластине $2R_1 = 4.1$ мм

вторым порядком аппроксимации по пространственной координате. Аппроксимационная сходимость проверялась сгущением узлов регулярной расчетной сетки. Выбор шагов интегрирования $h = 0.05$ мм и $\tau = 0.0002$ с обеспечивал устойчивость численных расчетов для выбранного диапазона значений параметров задачи. Погрешность при вычислении температуры горения образца не превышала 1.4 % на границах сопряженного теплообмена.

Основной целью решения задачи (1)–(4) был расчет критических условий реагирования (критического диаметра) прохождения волны безгазового горения через перфорированную преграду в зависимости от ее геометрических размеров и теплофизических свойств материала при фиксированном значении коэффициента теплоотдачи α . В процессе распространения волны горения в рассматриваемом комбинированном образце можно выделить три основных этапа: 1) горение смеси Ni + Al до пластины и тепловое взаимодействие волны горения с пластиной на поверхности контакта $x = (L - h)/2$; 2) формирование и прохождение волны горения

через отверстие в пластине; 3) формирование и распространение фронта горения за преградой. Следует отметить, что при толщине пластины $h < 2$ мм зажигание части заряда, расположенной за пластиной, происходит даже при отсутствии в ней отверстия. Поверхность пластины $x = (L + h)/2$ в таком случае нагревается до температуры, способной инициировать горение смеси, расположенной за пластиной. В [26] проведено исследование прохождения волны горения стехиометрической смеси Ni + Al через поперечный инертный слой из прессованного медного порошка. При толщине слоя 6 мм и более волна горения не преодолевала инертную преграду.

На рис. 5 представлены поля глубины превращения слоя η и температуры в разные моменты времени горения образца с медной пластиной внутри него. Волна горения проходит через отверстие в пластине при околкритическом значении диаметра отверстия $2R_1 = 4.1$ мм и толщине пластины $h = 2$ мм. Высокая тепловая активность материала преграды в сочетании с внешними теплотериями опре-

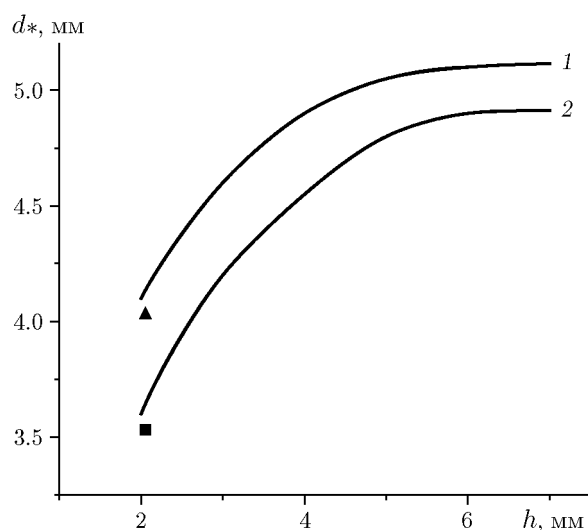


Рис. 6. Расчетные зависимости критического диаметра отверстия от толщины пластины:
1 — медная пластина (▲ — эксперимент), 2 — стальная пластина (■ — эксперимент)

деляет динамику прохождения фронта горения через отверстие в преграде. При достижении волной горения пластины фронт заходит в отверстие и искривляется (рис. 5,а). Теплоперенос в инертную преграду приводит к падению температуры во фронте на $350 \div 400$ К и скорости горения до $2 \div 3$ мм/с в узком канале. Максимальная расчетная температура горения наблюдается при выходе волны горения из отверстия в пластине (рис. 5,з) и составляет 1840 К, что на 217 К выше экспериментальных данных по температуре горения смеси 80 % Ni + 20 % Al. Высокая температура горения за преградой обусловлена формированием за ней широкого прогретого слоя. Третий этап горения образца на начальной стадии характеризуется грибообразной формой фронтальной поверхности (рис. 5,б) на выходе зоны горения из отверстия в преграде. Ранее в [28] проведено теоретическое исследование распространения волны горения по цилиндрическому образцу со ступенчато изменяющимся диаметром, где рассчитано критическое значение диаметра поджигающего (меньшего) цилиндра. Отмечено, что при решении такой модельной задачи критические условия возникают только при задании внешнего теплоотвода.

Уменьшение диаметра отверстия до 3 мм приводит к остановке горения на входе в канал или внутри него. На рис. 6 представлены результаты расчетов критического диамет-

ра отверстия $d_* = 2R_1$, минимально необходимого для прохождения волны горения через перфорированную преграду, в зависимости от толщины и материала пластины. С увеличением толщины пластины значение критического диаметра растет нелинейно, наиболее сильно в диапазоне $2 \leq h \leq 4$ мм, но при $h \geq 5$ мм зависимость слабая. Значение критического диаметра в зависимости от толщины лежит в диапазоне $3.6 \leq d_* \leq 4.9$ мм для стальной пластины и $4.1 \leq d_* \leq 5.1$ мм — для медной, что коррелирует с экспериментально наблюдаемым значением. Расхождение экспериментального и расчетных значений возможно связано с выбранным в расчетах значением коэффициента теплоотдачи и с гомогенной моделью горения, не учитывающей особенностей межфазного взаимодействия порошковой смеси Ni + Al в условиях узкого канала. Так, в ряде экспериментов наблюдалось недогорание смеси на стенках канала при успешном прохождении через него волны горения. С учетом вышесказанного интересным представляется результат исследования [18]: при горении пороха Н критический диаметр образца, заключенного в алюминиевую оболочку, при давлении 1 атм равен 3 мм. Относительная близость критических значений диаметра для интерметаллидной системы и пороха Н, возможно, связана с ведущей зоной реакций в конденсированной фазе и с интенсивностью теплоотвода из зоны горения.

ВЫВОДЫ

Методом СВС для сэндвич-образца цилиндрической формы, сформированного из смеси 80 % Ni + 20 % Al и металлической перфорированной пластины, исследованы критические условия распространения фронта экзотермической реакции через отверстие в пластине. Критический диаметр отверстия, минимально необходимый для прохождения волны безгазового горения через перфорированную преграду, зависит от теплопроводящих свойств металла и толщины пластины. Более высокие теплопроводящие свойства и увеличение толщины металлической пластины приводят к росту значения критического диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogachev A. S., Mukasyan A. S. Combustion for Material Synthesis. — CRC Press, 2015.

2. Андреев Д. Е., Икорников Д. М., Юхвид В. И., Санин В. Н. Исследование процессов горения высококалорийной термитной смеси на поверхности титановой основы // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 5. — С. 93–98. — DOI: 10.15372/FGV20170511.
3. Юхвид В. И., Андреев Д. Е., Санин В. Н., Сачкова Н. В. Автоволновые химические превращения высокоэкзотермических смесей на основе оксида ниобия с алюминием // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 5. — С. 99–102. — DOI: 10.15372/FGV20170512.
4. Юхвид В. И., Андреев Д. Е., Икорников Д. М., Санин В. Н., Сачкова Н. В., Ковалев И. Д. Горение термитных систем на основе оксида титана с комплексным восстановителем и энергетической добавкой под воздействием перегрузки // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 43–49. — DOI: 10.15372/FGV20190606.
5. Андреев Д. Е., Вдовин Ю. С., Юхвид В. И., Сачкова Н. В., Ковалев И. Д. Центробежный автоволновой синтез композиционных материалов Mo—Si—B // Хим. физика. — 2020. — Т. 39, № 3. — С. 24–28. — DOI: 10.31857/S0207401X20030024.
6. Столин А. М., Бажин П. М., Алымов М. И., Михеев М. В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошка карбида титана в условиях давления со сдвигом // Неорг. матер. — 2018. — Т. 54, № 6. — С. 547–553. — DOI: 10.7868/S0002337X18060015.
7. Бажин П. М., Столин А. М., Константинов А. С., Чижигов А. П., Прокопец А. Д., Алымов М. И. Особенности строения слоистых композиционных материалов на основе боридов титана, полученных методом свободного СВС-сжатия // Докл. АН. — 2019. — Т. 488, № 3. — С. 263–266.
8. Прокопец А. Д., Константинов А. С., Чижигов А. П., Бажин П. М., Столин А. М. Закономерности формирования структуры градиентных композиционных материалов на основе МАХ-фазы Ti_3AlC_2 на титане // Неорг. матер. — 2020. — Т. 56, № 10. — С. 1145–1150. — DOI: 10.31857/S0002337X20100127.
9. Рогачев А. С. Механическая активация гетерогенных экзотермических реакций в порошковых смесях // Успехи химии. — 2019. — Т. 88, № 9. — С. 875–900.
10. Корчагин М. А., Филимонов В. Ю., Смирнов В. Е., Ляхов Н. З. Тепловой взрыв механически активированной смеси $3Ni + Al$ // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 48–53.
11. Абдулкаримова Р. Г., Кетегенов Т. А., Мансуров З. А., Лапшин О. В., Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. О влиянии фазовых превращений на неизотермический синтез в механоактивированных гетерогенных системах // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 56–67.
12. Рыбанин С. С., Стесик Л. Н. Теория горения конденсированного топлива с плоским теплопроводящим элементом // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 5. — С. 634–643.
13. Бахман Н. Н., Лобанов И. Н. Влияние диаметра теплопроводящих элементов на их эффективность при горении конденсированных систем // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 46–50.
14. Прокофьев В. Г., Писклов А. В., Смоляков В. К. Влияние теплопроводящего элемента на безгазовое горение образцов цилиндрической формы в неадиабатических условиях // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 66–71.
15. Ивлева Т. П. Влияние макронеоднородности среды на характеристики волны твердопламенного горения в термически и химически неоднородных средах // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 39–49.
16. Нефедова О. И., Новиков С. С., Похил П. Ф., Рязанцев Ю. С. О зависимости величины слоя несгоревшего пороха на металлической пластине от начальной температуры // ПМТФ. — 1970. — Т. 11, № 2. — С. 85–89.
17. Зенин А. А., Лейпунский О. И., Пучков В. М. Параметры зон горения пороха, погасающего на подложке // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 3. — С. 75–78.
18. Зенин А. А., Лейпунский О. И., Писковский С. В., Пучков В. М. Горение и погасание баллиститного пороха вблизи критического диаметра // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 2. — С. 179–185.
19. Найбороденко Ю. С., Итин В. И. Исследование процесса безгазового горения смесей порошков разнородных металлов. I. Закономерности и механизм горения // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 3. — С. 343–353.
20. Итин В. И., Найбороденко Ю. С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. — Томск: Изд-во ТГУ, 1989.
21. Крайнов А. Ю. Влияние теплофизических характеристик инертной преграды и теплопотерь на распространение волны горения // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 16–19.
22. Кришеник П. М., Костин С. В., Рогачёв С. А. Исследование аккумуляции тепловой энергии при переходе волны горения через клиновидную преграду // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 2. — С. 60–67. — DOI: 10.15372/FGV20210206.
23. Maruta K., Kim N. I. A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes // Combust. Flame. — 2006. — V. 146. — N 1-2. — P. 283–301. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.03.004.

24. **Lin S., Huang X.** Quenching of smoldering: Effect of wall cooling on extinction // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 3. — P. 5015–5022. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.05.017.
25. **Plathner F. V., Quintiere J., Hees P.** Analysis of extinction and sustained ignition // *Fire Saf. J.* — 2019. — V. 105. — P. 51–61. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.02.003.
26. **Gabbasov R. M., Kitler V. D., Prokof'ev V. G., Shulpekoy A. M.** Layered NiAl/Cu/NiAl composite by SHS in a mode of frontal combustion // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 2020. — V. 29, N 2. — P. 104–107. — DOI: 10.3103/S1061386220020053.
27. **Шиляев М. И., Борзых В. Э., Дорохов А. Р.** К вопросу о лазерном зажигании порошковых систем никель — алюминий // *Физика горения и взрыва.* — 1994. — Т. 30, № 2. — С. 14–18.
28. **Писклов А. В., Прокофьев В. Г., Смоляков В. К.** Твердопламенное горение цилиндрических образцов со ступенчато изменяющимся диаметром // *Физика горения и взрыва.* — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 26–30.

Поступила в редакцию 18.10.2021.

После доработки 17.11.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.