УДК 536.46

Численное исследование влияния вида тугоплавких частиц на формирование продукта в условиях объемного синтеза

А. Г. Князева, Н. В. Букрина

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр-т Академический, 2/4

Аннотация. Предложена двумерная модель объемного синтеза композита из чистых элементов с добавлением инертных частиц. Учитывается нагрев стенок реактора тепловым излучением от устройства, температура которого изменяется по заданному закону. Химические реакции описаны суммарной схемой, которая соответствует синтезу интерметаллида Ni_3Al из стехиометрической смеси порошка $3\text{Ni}+\text{Al}$. Кинетический закон учитывает замедление реакции слоем продукта. Эффективные теплофизические свойства смеси в реакторе зависят от свойств исходных компонентов и объемной доли инертных частиц. Задача решена численно. Установлено, что изменение температуры и степени превращения в этих условиях не всегда соответствует классическому тепловому взрыву. Это связано с условиями сопряженного теплообмена. Показано, что неоднородное распределение температуры в порошковом компакте является важным фактором, определяющим динамику процесса. Изменение доли инертных частиц в прессовке неоднозначно влияет на динамику синтеза.

Ключевые слова: объемный синтез, инертные частицы, цилиндрический реактор, численное моделирование, сопряженный теплообмен.

✉ Анна Князева, e-mail: anna-knyazeva@mail.ru

Numerical Study of the Effect of the Type of Refractory Particles on Product Formation Under Bulk Synthesis Conditions

Anna G. Knyazeva, Natalia V. Bukrina

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Academicheskii pr-t, 2/4, Tomsk, 634055, Russia)

Summary. Methods of combustion for the synthesis of composites are widely used in modern chemical and metallurgical technologies. According to experimental data, the most homogeneous product could be obtained by bulk synthesis. Such modes are often used to produce composite materials. However the high reaction rate of bulk synthesis significantly complicates the control of the formation of the product. One way to reduce the synthesis temperature consists in the inert particles introducing into the reaction mixture. Additionally the heating rate can be changed by changing the reactor wall thickness. However, the specifics of the conjugate heat exchange of the reaction mixture with the reactor walls under various synthesis conditions are rarely analyzed in publications. To demonstrate the role of these factors, a two-dimensional model of bulk synthesis of a composite from pure elements with the addition of inert particles is proposed in this work. The heating of the reactor walls by thermal radiation from a device whose temperature varies according to a given law is taken into account. The heat contact between reactor walls and powder mixture is assumed as ideal. The chemical reactions are described by a summary reaction scheme that corresponds to the synthesis of Ni_3Al from elements $3\text{Ni}+\text{Al}$. The kinetic law takes into account the retardation of the reaction by the product layer and contains corresponding parameter. The effective thermal-physical properties of the mixture in the reactor depend on the properties of the initial components and the volume fraction of inert particles. The proposed model is implemented numerically. Process dynamics for WC, TiC, and Al_2O_3 - particles are analyzed. Steel is used as the material of the reactor walls. It is established that the synthesis process in the volume is inhomogeneous, that is directly related to the conjugate heat exchange conditions. In spite of this, for the chosen set of reactor parameters and particle fraction, the result is the same: there are almost no unspent reagents in the final products. The dynamics of temperature change in different parts of the reactor may not correspond to the classical thermal explosion. This indicates that the transformation of the reagents into the product occurs in two stages. The first stage ends with an incomplete transformation. Then, due to the heat stored in the compact and in the reactor walls, the reactions are accelerated again, which leads to the formation of a final composite. Changing the fraction of inert particles in the mixture has an ambiguous effect on the dynamics of synthesis, That is due to the thermophysical properties changing with the fraction of particles and a decrease in the total heat release in the reaction.

Keywords: volume synthesis, inert particles, cylindrical reactor, numerical modeling, conjugate heat.

✉ Anna Knyazeva, e-mail: anna-knyazeva@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Методы горения и теплового взрыва для синтеза композитов широко используются в современных химических и металлургических технологиях для создания высококачественных тугоплавких соединений и композитов [1 – 3]. Методы основаны на нагревании порошковой смеси или прессовки порошков до температуры самовозгорания или теплового взрыва. Для обеспечения инициирования реакции используются различные источники тепла и разные условия для организации процесса. Процессы создания новых материалов в любом случае сложны и многофакторны. Результат зависит от способа подготовки реагентов, от конкретных лабораторных условий (геометрии, способа инициирования реакции), от кинетики химико-диффузионных процессов на разных структурных уровнях, которая в порошковых смесях далеко неочевидна и до сих пор вызывает много вопросов.

Согласно экспериментальным данным, наиболее однородный продукт получается при объемном синтезе (реакционное спекание или тепловой взрыв). Такие режимы часто используются для получения композиционных материалов. Однако различные условия и скорости нагрева могут приводить к различному фазовому составу и структуре композитов [4, 5]. Из классических теоретических работ [6, 7] известно, что при нагреве с разной скоростью в смеси реагентов возникают различные условия для инициирования реакции. Это подтверждается и многочисленными экспериментами. Так, в [8] было обнаружено, что температура воспламенения и максимальная температура значительно повышаются при увеличении скорости нагрева смеси Ni-Al. По данным [9], скорость нагрева является определяющим фактором при анализе теплового взрыва в системе Ni-Al, что практически является подтверждением результатов более ранних работ.

Высокие скорости реакции в условиях объемного высокотемпературного синтеза интерметаллидов затрудняют возможность контролирования процесса формирования структурного и фазового состояния конечного продукта. Один из способов снижения температуры синтеза состоит во введении в реакционную смесь инертных частиц, которые дополнительно могут выполнять различные функции [10 – 13]. Доля инертных частиц в условиях синтеза [14] может рассматриваться как контролирующий фактор. Инертный наполнитель в смеси никеля и алюминия изменяет скорость нагрева смеси, что связано с изменением эффективной теплоемкости и уменьшением общего тепловыделения в реакциях. В работах [13] композит NiAl/WC высокой плотности был изготовлен в условиях, близких к тепловому взрыву. В качестве исходных материалов использовались коммерческие порошки Ni, Al и WC. Для наблюдения за процессом реакции изучалось изменение температуры во времени. Как и в других подобных исследованиях с добавками инертных частиц, авторы обнаружили, что увеличение концентрации WC может повысить температуру начала реакции и снизить максимальную температуру процесса синтеза. Влияние частиц на условия синтеза и фазовый состав продуктов в данной статье не сообщается.

Отметим, что метод синтеза композитов из порошковых смесей, содержащих инертные частицы, существенно отличается от метода синтеза, когда упрочняющие включения образуются одновременно с интерметаллической матрицей [15 – 18]. В первом случае инертные частицы поглощают тепло, а затем отдают его для поддержания реакции. Во втором случае синтез включений сопровождается дополнительным экзоэффектом. Кроме того, синтез во втором случае является преимущественно жидкофазным процессом.

В целом, система Ni-Al относится к наиболее изученным [19 – 24]. Тем не менее, необходимость разработки новых технологий производства композитов на основе Ni и Al порождает множество вопросов [25 – 30]. Например, дополнительно скорость нагрева может быть изменена путем изменения толщины стенок реактора. Сопряженный теплообмен между порошковой смесью и стенками реактора может привести к неоднородному температурному

полю и вызвать неоднородное изменение состава прессовки в процессе синтеза, что нужно учитывать при сравнении результатов исследований, полученных в разных лабораторных условиях.

Оптимизировать технологии, помимо термодинамических расчетов, можно с помощью математического моделирования, учитывающего различные физические процессы и химические реакции в разных масштабах. Классические модели теплового взрыва модифицируются с учетом кинетики диффузии в реакционных ячейках как для системы Ni-Al [31, 32], так и для других систем [33, 34]; в отдельных работах учитываются фазовые превращения [35, 36], предварительная механическая обработка [37, 38] и другие факторы. Однако специфика условий сопряженного теплообмена между реакционной смесью и стенками реактора и вакуумной камеры при различных условиях синтеза достаточно редко анализируется в публикациях.

Цель настоящей работы в численном исследовании влияния вида тугоплавких частиц на динамику синтеза в условиях сопряженного теплообмена со стенками реактора.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования воспользуемся двумерной моделью, которая представлена в [39], однако модифицируем ее аналогично [40, 41], добавив в реакционную смесь инертные частицы. Наличие инертных частиц в области реагента в рамках теплофизической модели можно учесть через эффективные теплофизические свойства. Поскольку реальная структура композита изначально неизвестна, мы можем использовать простой подход и предположить, что теплоемкость, как и энтропия, через которую теплоемкость определяется, – аддитивная величина. Поэтому она удовлетворяет соотношению

$$\langle c_1 \rho_1 \rangle = c_p \rho_p \eta_p + (c_1 \rho_1)^0 (1 - \eta_p), \quad (1)$$

где η_p – объемная доля инертных частиц, c_p, ρ_p – теплоемкость и плотность материала, из которого изготовлены частицы; $(c_1 \rho_1)^0$ – средняя или эффективная теплоемкость матрицы – смеси исходных реагентов и продуктов реакции с учетом наличия пористости в исходной прессовке. В одномерной модели [40] при изучении влияния доли инертных частиц на закономерности формирования конечного продукта показано, что их неоднородное распределение оказывает незначительное влияние на динамику нагрева. Поэтому в описанной ниже двумерной модели для вычисления эффективного коэффициента теплопроводности используем формулу, аналогичную (1)

$$\langle \lambda_1 \rangle = \lambda_p \eta_p + \lambda_1^0 (1 - \eta_p), \quad (2)$$

где λ_p – коэффициент теплопроводности частиц; λ_1^0 – осредненный коэффициент теплопроводности материала матрицы.

Так как инертные частицы не участвуют в реакциях, то с их наличием будет связано и изменение тепловыделения. Весь комплекс реакций опишем суммарной схемой "реагент" – "продукт реакции". В результате двумерная сопряженная задача (в которой учитывается теплообмен со стенками реактора), соответствующая рис. 1, примет следующий вид.

Для области 1 запишем уравнение теплопроводности с источником тепла W_{ch} химической природы

$$\langle c_1 \rho_1 \rangle \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\langle \lambda_1 \rangle r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\langle \lambda_1 \rangle \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + (1 - \eta_p) W_{ch}. \quad (3)$$

Для областей 2 и 3, относящихся к стенкам реактора, имеет место двумерное уравнение теплопроводности, аналогичное уравнению (3), но без химического источника тепла:

$$c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_k r \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial z} \right), \quad k = 2, 3. \quad (4)$$

Рис. 1. Условная схема реактора для процесса синтеза композита в режиме теплового взрыва при регулируемом нагреве порошковой прессовки

Fig. 1. Conventional schema of the reactor for the composite synthesis process in the thermal explosion mode with controlled heating of the powder compact

Химические реакции возможны в области 1 ($0 \leq r \leq R_1$; $0 \leq z \leq H$). Комплекс химических реакций, опишем суммарной схемой, соответствующей реакции образования интерметаллида Ni_3Al . Это предполагает, что компоненты смеси Ni и Al взяты в стехиометрическом соотношении 3:1, следствием чего будет единственное химическое соединение:

В этом случае нам требуется единственное уравнение для степени превращения Y

$$\frac{dY}{dt} = \omega(Y, T_1). \quad (6)$$

Полагаем, что скорость реакции зависит от температуры (по закону Аррениуса), от концентрации реагента $(1-Y)$ и тормозится слоем образовавшегося тугоплавкого продукта:

$$\omega(Y, T_1) = k_0 (1-Y) \exp \left(-\frac{E}{RT_1} \right) \exp(-SY),$$

где E – энергия активации суммарной химической реакции, Дж/моль; k_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/с; $R = 8.31$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная, S – параметр торможения. Чем больше параметр S , тем более значительное влияние оказывает продукт реакции на динамику синтеза, замедляя реакцию. В результате уменьшается суммарное тепловыделение в реакции, и химическая реакция может не завершиться. Концентрации неизрасходованных реагентов и конечной фазы Ni_3Al находили из стехиометрических соотношений.

Химическое тепловыделение в (3) есть:

$$W_{ch} = Q\omega,$$

где Q – теплота химической реакции, Дж/м³.

Согласно условиям эксперимента [42], теплообменом с окружающей средой можно пренебречь, а тепловой контакт смеси со стенками реактора можно считать идеальным. Нагрев реактора осуществляется тепловым излучением от нагревателя, зависимость температуры которого от времени известна из эксперимента. Это приводит к граничным условиям, аналогичным [39]:

$$\begin{aligned} z = -H_1 : \quad & 0 \leq r < R_1 & -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha_3(T_3 - T_e) - \varepsilon_3(T_3^4 - T_w^4), \\ & R_1 \leq r < R_2 & -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_2(T_2 - T_e) - \varepsilon_2(T_2^4 - T_w^4), \\ z = H + H_2 : \quad & 0 \leq r < R_1 & \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha_3(T_3 - T_e) - \varepsilon_3(T_3^4 - T_w^4), \\ & R_1 \leq r < R_2 & \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \alpha_2(T_2 - T_e) - \varepsilon_2(T_2^4 - T_w^4), \end{aligned}$$

где T_w – температура стенок вакуумной камеры (нагревателя).

В центре реактора имеет место условие симметрии.

В начальный момент времени задана одинаковая температура во всех областях и нулевая доля продукта реакции:

$$t = 0: \quad T_1 = T_2 = T_3 = T_0, \quad Y = 0.$$

В качестве материала стенок реактора в настоящей работе использована сталь. В качестве тугоплавких частиц использованы частицы карбидов титана и вольфрама, а также частицы оксида алюминия, имеющие температуры плавления выше температуры плавления реагентов. Свойства реакционной смеси рассчитаны по правилу смеси с учетом содержания компонентов и пористости исходной прессовки. Теплофизические свойства веществ, найденные в литературе и использованные в оценках, приведены в таблице.

Таблица – Теплофизические свойства веществ [43-45]

Table – Thermophysical properties of substances [43-45]

	c [Дж/(г·К)]	ρ [г/см ³]	λ [Вт/(см·К)]
TiC	0.842	4.93	0.36
WC	0.184	1.56	1.97
Al ₂ O ₃	0.775	3.97	0.4
Al	0.951	2.7	2.4
Ni	0.482	8.9	0.8

Расчеты проведены для следующих параметров реактора: $R_1 = 3$, $R_2 = 4.5$, $H_1 = 4$, $H = 7.5$, $H_2 = 1.5$ см; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$, Вт/(см²·К⁴); $\varepsilon = 0.4$. Параметры суммарной реакции заимствованы из [46], энергия активации реакции и тепловыделение в реакции (5) имеют значения: $E = 140000$, Дж/моль; $Q = 5653$, Дж/см³, $k_0 = 0.572 \cdot 10^6$.

Задачу решали численно. Использованы неявная разностная схема второго порядка аппроксимации по пространственным шагам и первого порядка аппроксимации по времени; расщепление по координатам и метод линейной прогонки. Граничные условия также аппроксимированы со вторым порядком по пространственным шагам, для чего использовано разложение температуры в ряды Тейлора в окрестности граничных точек. В результате расчетов определяли температурные поля в различных областях и степень превращения (долю продукта реакции) в области 1. Более подробно алгоритм описан в [39].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2, *a*, где изображена зависимость температуры от времени в центре прессовки, видим два максимума. Первый из них связан с ускорением реакции в центре прессовки, а второй – с ускорением реакции в соседних областях. Если первый максимум для всех частиц наблюдается практически в одно и то же время, хотя выражен он по-разному, то вследствие различия свойств разных частиц дальнейшее развитие процесса в разных случаях различно. Нетипичная для классического теплового взрыва динамика изменения среднеинтегральной степени превращения (рис. 2, *b*) также свидетельствует о том, что превращение реагентов в продукт происходит в два этапа. Первый этап завершается неполным превращением. Затем вследствие запасаемого в прессовке и в стенках реактора тепла реакции ускоряются вновь, что приводит к образованию композита.

Рис. 2. Зависимость температуры в центре прессовки (*a*) и среднеинтегральной степени превращения (*b*) от времени для реакционной смеси с добавлением различного рода частиц. Номера кривых соответствует частицам 1 – TiC; 2 – WC; 3 – Al₂O₃. $\eta_p = 0.1$

Fig. 2. Dependence of temperature in the center of pressing (*a*) and the average integral conversion level (*b*) on time for the reaction mixture with the addition of various kinds of particles. The numbers of the curves correspond to the particles: 1 – TiC; 2 – WC; 3 – Al₂O₃, $\eta_p = 0.1$

Влияние разного вида частиц на неоднородный характер формирования композита "Ni₃Al + тугоплавкие частицы" показано на рис. 3. В результате объемного синтеза при одинаковых условиях воздействия для различного вида частиц, наблюдаем различный характер формирования продукта. Неоднородный характер температурного поля показывает, что единственной термодпары, по показаниям которой в экспериментах часто судят о динамике процесса, может оказаться недостаточно для фиксации момента инициирования реакции. Несмотря на это, при выбранном наборе параметров реактора и доли частиц результат оказывается одинаковым – в продуктах практически не остается неизрасходованных реагентов. Нагрев прессовки начинается от стенок реактора, однако затем максимальная температура смещается к центру, где реакции быстро завершаются. Допреобразование происходит постепенно.

Рис. 3. Распределения в реакторе температуры (a-c) и степени превращения (d-f) для различных моментов времени с добавлением в смесь различного рода включений ($\eta_p = 0,1$).

Вид частиц: a, d) – TiC; b, e) – WC; c, f) – Al_2O_3 . Моменты времени: t = 1 – 200, 2 – 250, 3 – 900 с

Fig. 3. Fields of temperature (a-c) and conversion level (d-f) in the reactor volume at different moments of time with the addition of different kinds of inclusions to the mixture ($\eta_p = 0,1$).

Kind of particles: a,d) – TiC; b,e) – WC; c,f) – Al_2O_3 . Time moments: t = 1 – 200, 2 – 250, 3 – 900 s

Динамика процесса и значение максимальной температуры зависят и от доли частиц, что показано на рис. 4. Для $\eta_p = 0.35$, например (кривые 2), на кривых имеются три участка. Первый соответствует началу процесса в центре прессовки. Однако вследствие теплоотвода в соседние слои реакции тормозятся. Второй всплеск температуры связан с формированием значительной прогретой области, ну а третий – с ускорением реакции вблизи стенок реактора. Замедление процесса в целом связано с затратами тепла на нагрев частиц. Однако аккумулированное в частицах тепло и связанное с этим в модели изменение свойств (теплоемкости и теплопроводности) также способствует перераспределению тепла и реакциям, с чем и связано неоднозначное влияние доли частиц на динамику процесса.

Рис. 4. Зависимость от времени температуры (a) и степени превращения (b), осредненной по объему реактора, для различных значений объемной доли частиц WC. 1 – $\eta_p = 0.1$; 2 – $\eta_p = 0.35$; 3 – $\eta_p = 0.5$

Fig. 4. Dependence on time for temperature (a) and the average integral conversion level (b) for different volume fraction of particles. Curves numbers: 1 – $\eta_p = 0.1$; 2 – $\eta_p = 0.35$; 3 – $\eta_p = 0.5$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках двумерной модели объемного синтеза в цилиндрическом реакторе показано, что процесс синтеза в объеме является неоднородным. Динамика изменения температуры в разных частях реактора может не соответствовать классическому тепловому взрыву. В результате процесса происходит полное превращение реагентов в продукт реакции, что соответствует данным эксперимента [42]. Изменение доли инертных частиц в прессовке неоднозначно влияет на динамику синтеза, что связано с изменяющимися с долей частиц теплофизическими свойствами и уменьшением суммарного тепловыделения в реакции. Однако в соответствии с неравновесным характером процесса, суммарная реакция может не давать представления о составе конечного продукта даже для стехиометрической исходной смеси, что требует специального исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, номер темы FWRW-2019-0035.

The work was supported by the state task of the ISPMS SB RAS, topic no. FWRW-2019-0035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merzhanov A. G. History and recent developments in SHS // *Ceramics International*, 1995, vol. 21, no. 5, pp. 371-379. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)96211-7](https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)96211-7)
2. Рогачев А. С., Мукасян А. С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 400 с.
3. Левашов Е. А., Рогачев А. С., Юхвид В. И., Боровинская И. П. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: БИНОМ, 1999. 176 с.
4. Zhu X., Zhang T., Marchant D., Morris V. The Structure and Properties of NiAl Formed by SHS Using Induction Heating // *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 3, pp. 1251-1260. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.002>
5. Siemiaszko D., Jóźwiak S., Czarnecki M., Bojar Z. Influence of Temperature during Pressure-Assisted Induction Sintering (PAIS) on Structure and Properties of the Fe₄OAl Intermetallic Phase // *Intermetallics*, 2013, vol. 41, pp. 16-21.
6. Барзыкин В. В., Гонтковская В. Т., Мержанов А. Г., Худяев С. И. К нестационарной теории теплового взрыва // *Прикладная механика и техническая физика*. 1964. № 3. С. 118-125.
7. Мержанов А. Г., Струнина А. Г. Закономерности теплового взрыва в условиях нагрева с постоянной скоростью // *Физика горения и взрыва*. 1965. № 1. С. 59-69.
8. Lee H. -Y., Akira I., Kim S.-H., Kim K.-B. The effects of induction heating rate on properties of Ni-Al based intermetallic compound layer coated on ductile cast iron by combustion synthesis // *Intermetallics*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 1050-1056. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2006.12.007>
9. Thiers L., Mukasyan A. S., Varma A. Thermal Explosion in Ni-Al System: Influence of Reaction Medium Microstructure // *Combustion and Flame*, vol. 131, no. 1-2, pp. 198-209. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00402-9)
10. Бондарь М. П., Корчагин М. А., Ободовский Е. С. Высокоэнергетические методы создания мезокомпозиционного материала с включениями, содержащими нанокристаллические частицы // *Физика горения и взрыва*. 2010. № 1. С. 126-131.
11. Лапшин О. В., Боянгин Е. Н., Овчаренко В. Е. Термокинетические характеристики конечной стадии теплового взрыва порошковой смеси 3Ni+Al+TiC // *Физика горения и взрыва*. 2005. № 1. С. 73-80.
12. Yuan J., Zhang X., Li B., Wang X., Sun K. Microstructure and tribological behavior of NiAl/WC composites fabricated by thermal explosion reaction at 800 °C // *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 693, pp. 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.022>
13. Yuan J., Zhang X., Zhang C., Sun K., Liu C. In-situ synthesis of NiAl/WC composites by thermal explosion reaction // *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 9, pp. 10992-10996. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.237>
14. Овчаренко В. Е., Боянгин Е. Н. Высокотемпературный синтез интерметаллида Ni₃Al в режиме теплового взрыва порошковой смеси чистых элементов с инертным наполнителем // *Физика горения и взрыва*. 1999. № 4. С. 63-66.
15. Rahaei M. B. In-Situ Manufacturing of NiAl-TiC Composites with Three Dimensional (3D) Discrete Particular Network and Bi-Continuous Microstructures // *Advanced Powder Technology*, 2019, vol. 30, pp. 1025-1033. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.02.017>

16. Zhu X., Zhang T., Marchant D., Morris V. Combustion synthesis of TiC-NiAl composite by induction heating // Journal of the European Ceramic Society, 2010, vol. 30, no. 13, pp. 2781-2790. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.06.002>
17. Shokati A. A., Parvin N., Sabzianpour N., Shokati M., Hemmati A. In situ synthesis of NiAl-NbB₂ composite powder through combustion synthesis // Journal of Alloys and Compounds, 2013, vol. 549, pp. 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.024>
18. Xia W., Mehrizi M. Z. Direct synthesis of NiAl intermetallic matrix composite with TiC and Al₂O₃ reinforcements by mechanical alloying of NiO-Al-Ti-C powder mixture // Ceramics International, 2021, vol. 47, pp. 26863-26868. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.095>
19. Grapes M. D., Santala M. K., Campbell G. H., LaVan D. A., Weihs T. P. A Detailed Study of the Al₃Ni Formation Reaction Using Nanocalorimetry // Thermochimica Acta, 2017, vol. 658, pp. 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.10.018>
20. Biswas A., Roy S. K. Comparison between the Microstructural Evolutions of Two Modes of SHS of NiAl: Key to a Common Reaction Mechanism // Acta Materialia, 2004, vol. 52, no. 2, pp. 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.018>
21. Biswas A., Roy S. K., Gurumurthy K. R., Prabhu N., Banerjee S. A Study of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of NiAl in Thermal Explosion Mode // Acta Materialia, 2002, vol. 50, no. 4, pp. 757-773. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00387-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00387-1)
22. Bochenek K., Basista M. Advances in Processing of NiAl Intermetallic Alloys and Composites for High Temperature Aerospace Applications // Progress in Aerospace Sciences, 2015, vol. 79, pp. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.003>
23. Curfs C., Turrillas X., Vaughan G. B. M., Terry A. E., Kwick A., Rodríguez M. A. Al-Ni Intermetallics Obtained by SHS; A Time-Resolved X-Ray Diffraction Study // Intermetallics, 2007, vol. 15, no. 9, pp. 1163-1171. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2007.02.007>
24. Morsi K. Review: Reaction Synthesis Processing of Ni-Al Intermetallic Materials // Materials Science and Engineering: A, 2001, vol. 299, pp. 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01407-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01407-6)
25. Xanthopoulou G., Marinou A., Vekinis G., Lekatou A., Vardavoulas M. Ni-Al and NiO-Al Composite Coatings by Combustion-Assisted Flame Spraying // Coatings, 2014, vol. 4, pp. 231-252. <https://doi.org/10.3390/coatings4020231>
26. Kubaski E. T., Cintho O. M., Capocchi J. D. T. Effect of Milling Variables on the Synthesis of NiAl Intermetallic Compound by Mechanical Alloying // Powder Technology, 2011, vol. 214, no. 1, pp. 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.07.038>
27. Volyanski I., Шишковский И. В., Yadroitsev I., Щербakov В. И., Морозов Ю. Г. Послойный лазерный синтез интерметаллидов системы Cu-Al-Ni и эффект памяти формы // Неорганические материалы. 2016. Т. 52, № 6. С. 617-623. <https://doi.org/10.7868/S0002337X16060178>
28. Rosa R., Veronesi P., Poli G., Leonelli C., Corradi A. B., Casagrande A., Boromei I. Ni-Al-Ti Coatings Obtained by Microwave Assisted Combustion Synthesis // Surface Engineering, 2012, vol. 28, pp. 91-95. <https://doi.org/10.1179/1743294411Y.0000000046>
29. Maznoy A., Kiryashkin A., Kitler V., Solovyev A., Combustion Synthesis and Characterization of Porous Ni-Al Materials for Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells Application // Journal of Alloys and Compounds, 2017, vol. 697, pp. 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.350>
30. Školakova A., Körberová J., Kratochvíl P., Salvetr P., Deduytsche D., Novak P. A comprehensive description of reactions between nickel and aluminum powders during reactive sintering // Materials Chemistry and Physics, 2021, vol. 271, 124941(32 p.). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124941>
31. Лапшин О. В., Овчаренко В. Е. Математическая модель высокотемпературного синтеза алюминида никеля Ni₃Al в режиме теплового взрыва порошковой смеси чистых элементов // Физика горения и взрыва. 1996. № 3. С. 68-76.
32. Ковалев О. Б., Неронов В. А. Металлохимический анализ реакционного взаимодействия в смеси порошков никеля и алюминия // Физика горения и взрыва. 2004. № 2. С. 52-60.
33. Filimonov V. Yu., Koshelev K. B., Sytnikov A. A. Thermal Modes of Heterogeneous Exothermic Reactions. Solid-Phase Interaction // Combustion and Flame, 2017, vol. 185, pp. 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.06.020>
34. Кошелев К. Б. Исследование процессов структурообразования и саморазогрева в бинарной порошковой смеси Ti-Al в режиме статического теплового взрыва на основе диаграммы состояния // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 2. С. 44-47.
35. Худяев С. И. Влияние фазового перехода на процесс воспламенения // Физика горения и взрыва. 2003. № 6. С. 38-44.
36. Лапшин О. В., Смоляков В. К. Тепловой взрыв в безгазовой смеси, претерпевающей фазовый переход // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 3. С. 62-68. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15030085>
37. Смоляков В. К., Лапшин О. В. Тепловой взрыв в механоактивированных гетерогенных системах // Физика горения и взрыва. 2011. № 3. С. 74-83.
38. Лапшин О. В., Смоляков В. К. Моделирование теплового взрыва предварительно активированной смеси 3Ni + Al // Физика горения и взрыва. 2017. № 5. С. 64-69.

39. Bukrina N., Knyazeva A. Two-Dimensional Model of High-Temperature Synthesis of an Intermetallic in the Regime of Dynamic Thermal Explosion // *High Temperature Material Processes*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 65-79. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020033859>
40. Bukrina N., Knyazeva A. Influence of inert particles on the dynamics of controlled synthesis of a composite in cylindrical reactor with thick walls // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 152, 119553(12 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.119553>
41. Букрина Н. В., Князева А. Г. Влияние инертных частиц на физические закономерности объемного синтеза композита // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2020. Т. 63, № 7. С. 52-58. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/7/52>
42. Ovcharenko V. E., Boyangin E. N., Pshenichnikov A. P., Krilova T. A. Structural-Phase State and Strength Properties of Pressure-Synthesized Ni₃Al Intermetallic Compound // *Materials Science Forum. Materials and Processing Technology*, 2017, vol. 906, pp. 95-100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.906.95>
43. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1967, 474 с.
44. Шелудяк Ю. Е., Кашпоров Л. Я., Малинин Л. А., Цалков В. Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. 184 с
45. Физические величины / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
46. Bakinovskii A., Knyazeva A. G., Krinitcyn M. G., Kryukova O. N., Pobol I. L., Fedorov V. V., Rajczyk J. Electron Beam Assisted Deposition of Ni-Al Coatings onto Steel Substrate // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 245-255. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040034>

REFERENCES

1. Merzhanov A.G. History and recent developments in SHS. *Ceramics International*, 1995, vol. 21, no. 5, pp. 371-379. [https://doi.org/10.1016/0272-8842\(95\)96211-7](https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)96211-7)
2. Rogachev A. S., Mukasyan A. S. *Goreniye dlya sinteza materialov: vvedeniye v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the synthesis of materials: Introduction to structural macrokinetics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013. 400 p.
3. Levashov E. A., Rogachev A. S., Yukhvid V. I., Borovinskaya I. P. *Fiziko-khimicheskiye i tekhnologicheskiye osnovy samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza* [Physicochemical and technological principles of self-propagating high-temperature synthesis]. Moscow: BINOM Publ., 1999. 176 p.
4. Zhu X., Zhang T., Marchant D., Morris V. The Structure and Properties of NiAl Formed by SHS Using Induction Heating. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, no. 3, pp. 1251-1260. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.002>
5. Siemiaszko D., Jóźwiak S., Czarnecki M., Bojar Z. Influence of Temperature during Pressure-Assisted Induction Sintering (PAIS) on Structure and Properties of the Fe₄OAl Intermetallic Phase. *Intermetallics*, 2013, vol. 41, pp. 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.015>
6. Barzykin V. V., Gontkovskaya V. T., Merzhanov A. G., Khudyaev S. I. K nestatsionarnoy teorii teplovogo vzryva [On non-stationary theory of thermal explosion]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1964, no. 3, pp. 118-125. (In Russian).
7. Merzhanov A. G., Strunina A. G. Laws of Thermal Explosion with Constant Heating Rate. *Combustion. Explosion and Shock Waves*, 1965, no. 1, pp. 59-69. <https://doi.org/10.1007/BF00757151>
8. Lee H. -Y., Akira I., Kim S.-H., Kim K.-B. The effects of induction heating rate on properties of Ni-Al based intermetallic compound layer coated on ductile cast iron by combustion synthesis. *Intermetallics*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 1050-1056. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2006.12.007>
9. Thiers L., Mukasyan A. S., Varma A. Thermal Explosion in Ni-Al System: Influence of Reaction Medium Microstructure. *Combustion and Flame*, 2002, vol. 131, no. 1-2, pp. 198-209. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00402-9)
10. Bondar M. P., Korchagin M. A., Obodovskii E. S. High-Energy Methods of Creating a Mesocomposite Material with Inclusions Containing Nanocrystalline Particles. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 111-116. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/s10573-010-0018-4>
11. Lapshin O. V., Boyangin E. N., Ovcharenko V. E. Thermokinetic Characteristics of the Final Stage of the Thermal Shock of the 3Ni + Al + TiC Powder Mixture. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 64-70. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0007-1>
12. Yuan J., Zhang X., Li B., Wang X., Sun K. Microstructure and tribological behavior of NiAl/WC composites fabricated by thermal explosion reaction at 800 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 693, pp. 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.022>
13. Yuan J., Zhang X., Zhang C., Sun K., Liu C. In-situ synthesis of NiAl/WC composites by thermal explosion reaction. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 9, pp. 10992-10996. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.237>
14. Ovcharenko V. E., Boyangin E. N. High-Temperature Synthesis of Intermetallide Ni₃Al by Thermal Shock of a Powder Mixture of Pure Elements with Inert Filler. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 407-409. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/BF02674472>

15. Rahaei M. B. In-Situ Manufacturing of NiAl-TiC Composites with Three Dimensional (3D) Discrete Particular Network and Bi-Continuous Microstructures. *Advanced Powder Technology*, 2019, vol. 30, pp. 1025-1033. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.02.017>
16. Zhu X., Zhang T., Marchant D., Morris V. Combustion synthesis of TiC-NiAl composite by induction heating. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, vol. 30, no. 13, pp. 2781-2790. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.06.002>
17. Shokati A. A., Parvin N., Sabzianpour N., Shokati M., Hemmati A. In situ synthesis of NiAl-NbB₂ composite powder through combustion synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 549, pp. 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.08.024>
18. Xia W., Mehri M. Z. Direct synthesis of NiAl intermetallic matrix composite with TiC and Al₂O₃ reinforcements by mechanical alloying of NiO-Al-Ti-C powder mixture. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 26863-26868. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.095>
19. Grapes M. D., Santala M. K., Campbell G. H., LaVan D. A., Weihs T. P. A Detailed Study of the Al₃Ni Formation Reaction Using Nanocalorimetry. *Thermochimica Acta*, 2017, vol. 658, pp. 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.10.018>
20. Biswas A., Roy S. K. Comparison between the Microstructural Evolutions of Two Modes of SHS of NiAl: Key to a Common Reaction Mechanism. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, no. 2, pp. 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.018>
21. Biswas A., Roy S. K., Gurumurthy K. R., Prabhu N., Banerjee S. A Study of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of NiAl in Thermal Explosion Mode. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, no. 4, pp. 757-773. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00387-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00387-1)
22. Bochenek K., Basista M. Advances in Processing of NiAl Intermetallic Alloys and Composites for High Temperature Aerospace Applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, vol. 79, pp. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.003>
23. Curfs C., Turrillas X., Vaughan G. B. M., Terry A. E., Kvik A., Rodríguez M. A. Al-Ni Intermetallics Obtained by SHS; A Time-Resolved X-Ray Diffraction Study. *Intermetallics*, 2007, vol. 15, no. 9, pp. 1163-1171. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2007.02.007>
24. Morsi K. Review: Reaction Synthesis Processing of Ni-Al Intermetallic Materials. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 299, pp. 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01407-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01407-6)
25. Xanthopoulou G., Marinou A., Vekinis G., Lekatou A., Vardavoulis M. Ni-Al and NiO-Al Composite Coatings by Combustion-Assisted Flame Spraying. *Coatings*, 2014, vol. 4, pp. 231-252. <https://doi.org/10.3390/coatings4020231>
26. Kubaski E. T., Cintho O. M., Capocchi J. D. T. Effect of Milling Variables on the Synthesis of NiAl Intermetallic Compound by Mechanical Alloying. *Powder Technology*, 2011, vol. 214, no. 1, pp. 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.07.038>
27. Volyanski I., Shishkovsky I. V., Yadroitsev I., Shcherbakov V. I., Morozov Yu. G. Layer-by-Layer Laser Synthesis of Cu-Al-Ni Intermetallic Compounds and Shape Memory Effect. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 566-572. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0020168516060170>
28. Rosa R., Veronesi P., Poli G., Leonelli C., Corradi A. B., Casagrande A., Boromei I. Ni-Al-Ti Coatings Obtained by Microwave Assisted Combustion Synthesis. *Surface Engineering*, 2012, vol. 28, pp. 91-95. <https://doi.org/10.1179/1743294411Y.0000000046>
29. Maznoff A., Kirdyashkin A., Kitler V., Solov'yev A., Combustion Synthesis and Characterization of Porous Ni-Al Materials for Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells Application. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 697, pp. 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.350>
30. Školakova A., Körberová J., Kratochvíl P., Salvetti P., Deduytsche D., Novak P. A comprehensive description of reactions between nickel and aluminum powders during reactive sintering. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, vol. 271, 124941(30 p.). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124941>
31. Lapshin O. V., Ovcharenko V. E., Mathematical Model of High-Temperature Synthesis of Nickel Aluminide Ni₃Al by Thermal Shock of a Powder Mixture of Pure Elements. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1996, vol. 2, no. 3, pp. 299-305. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/BF01998460>
32. Kovalev O. B., Neronov V. A. Metallochemical Analysis of the Reaction in a Mixture of Nickel and Aluminum Powders. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 172-179. (In Russian). <https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000020139.07061.9e>
33. Filimonov V. Yu., Koshelev K. B., Sytnikov A. A. Thermal Modes of Heterogeneous Exothermic Reactions. Solid-Phase Interaction. *Combustion and Flame*, 2017, vol. 185, pp. 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.06.020>
34. Koshelev K. B. Issledovaniye protsessov strukturoobrazovaniya i samorazogreva v binarnoy poroshkovoy smesi Ti-Al v rezhime staticheskogo teplovogo vzryva na osnove diagrammy sostoyaniya [Studying the process of structure formation and self-heating in binary powder mixture Ti-Al in the mode of static thermal explosion on the basis of state diagram]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2008, vol. 312, no. 2, pp. 44-47. (In Russian).
35. Khudyaev S. I. Effect of the Phase Transition on the Ignition Process. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 644-649. (In Russian). <https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000007676.33964.03>

36. Lapshin O. V., Smolyakov V. K. Thermal explosion in a gasless system undergoing a phase transition. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2015, vol. 9, pp. 255-260. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S1990793115020086>
37. Smolyakov V. K., Lapshin O. V. Thermal Explosion in Mechanically Activated Heterogeneous Systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 314-322. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0010508211030087>
38. Lapshin O. V., Smolyakov V. K. Simulation of Thermal Explosion in a Pre-Activated 3Ni + Al Mixture. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 548-553. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0010508217050070>
39. Bukrina N., Knyazeva A. Two-Dimensional Model of High-Temperature Synthesis of an Intermetallic in the Regime of Dynamic Thermal Explosion. *High Temperature Material Processes*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 65-79. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020033859>
40. Bukrina N., Knyazeva A. Influence of inert particles on the dynamics of controlled synthesis of a composite in cylindrical reactor with thick walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 152, 119553(12 p.). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119553>
41. Bukrina N. V., Knyazeva A. G. Influence of Inert Particles on the Physical Regularities of Bulk Synthesis of Composite. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 63, pp. 1163-1170. (In Russian). <https://doi.org/10.1007/s11182-020-02163-8>
42. Ovcharenko V. E., Boyangin E. N., Pshenichnikov A. P., Krilova T. A. Structural-Phase State and Strength Properties of Pressure-Synthesized Ni₃Al Intermetallic Compound. *Materials Science Forum. Materials and Processing Technology*, 2017, vol. 906, pp. 95-100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.906.95>
43. Chirkin V. S. *Teplofizicheskiye svoystva materialov yadernoy tekhniki* [Thermophysical properties of nuclear technology materials]. Moscow: Atomizdat Publ., 1967. 474 p.
44. Sheludyak Yu. E., Kashporov L. Ya., Malinin L. A., Tsalkov V. N. *Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchikh sistem. Spravochnik* [Thermophysical properties of components of combustible systems]. Moscow: NPO Inform TEI Publ., 1992. 184 p.
45. *Fizicheskiye velichiny* [Physical Quantities]. Ed. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.
46. Bakinovskii A., Knyazeva A. G., Krinitcyn M. G., Kryukova O. N., Pobol I. L., Fedorov V. V., Rajczyk J. Electron Beam Assisted Deposition of Ni-Al Coatings onto Steel Substrate. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 245-255. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040034>

Поступила 12.11.2021; после доработки 15.11.2021; принята к опубликованию 22.11.2021
Received 12 November 2021; received in revised form 15 November 2021; accepted 22 November 2021

Князева Анна Георгиевна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, ИФПМ СО РАН, Томск, Российская Федерация, e-mail: anna-knyazeva@mail.ru

Anna G. Knyazeva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Principal Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation, e-mail: anna-knyazeva@mail.ru

Букрина Наталья Валерьевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ИФПМ СО РАН, Томск, Российская Федерация

Natalia V. Bukrina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation