

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ
АЭРОВЗВЕСИ КАПСУЛИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ**

УДК 536.46:566.468

Д. А. Ягодников, А. В. Воронежский

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
107005 Москва

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния капсулирования частиц на основные эксплуатационные характеристики и закономерности воспламенения и горения аэровзвеси частиц алюминия. Установлено, что нанесение на поверхность частиц алюминия покрытия на основе никеля, которое замещает оксидную пленку, позволяет увеличить реакционную способность аэровзвеси при сохранении исходной дисперсности частиц и энергетических характеристик алюминиево-воздушной смеси. На основе разработанной модели воспламенения капсулированной частицы с учетом ее напряженно-деформированного состояния определены временные и температурные границы сохранения защитных свойств покрытия и дано объяснение экспериментальных зависимостей.

Одним из наиболее важных факторов, препятствующих широкому практическому применению алюминия в качестве горючего энергетических и технологических установок является большой период индукции воспламенения. Из-за этого существенно увеличивается характерное время преобразования топлив на его основе, что не позволяет максимально реализовать их энергетический потенциал. Период индукции зависит от параметров окружающей среды (температура, давление, концентрация окислительных элементов и др.) и от свойств самого металла, вступающего в реакцию с окислительной средой, например, в виде отдельных частиц или газозвеси частиц порошкообразного алюминия (ПА). К последним, прежде всего, относятся размер частиц и состояние оксидной пленки, покрывающей частицу и предохраняющей ее от активного окисления. Именно начальные характеристики Al_2O_3 (тип и модификация кристаллической решетки, толщина, пористость и т. д.) и их изменение в процессе нагрева частицы определяют период индукции и предельную температуру окружающей среды, при которой наступает воспламенение алюминия.

В связи с изложенным становится актуальным устранение или ослабление защитных свойств оксидной пленки алюминия, что может быть достигнуто следующими способами:

- объемное модифицирование алюминия химически активными элементами;
- полное удаление Al_2O_3 с поверхности частиц;
- нанесение на поверхность частиц покрытия с заданными свойствами (капсулирование).

Первый метод заключается в объемной активации алюминия различными металлами, например оловом, галлием, индием и др. Он может быть реализован путем спекания этих металлов с алюминием с последующим размельчением (или распыливанием расплава в инертной атмосфере) до необходимой степени дисперсности [1]. Результаты рентгено-

структурного анализа показывают, что активирующие элементы располагаются на границах зерен алюминий — оксид алюминия. В процессе нагрева это приводит к ускорению растрескивания оксидной пленки, нарушению ее сплошности и интенсификации процесса воспламенения в целом.

К этому методу можно отнести использование магнезия в качестве легирующего компонента. Известно большое количество экспериментальных работ (см., например, [2, 3]) по исследованию влияния добавок этого элемента на характеристики воспламенения и горения алюминия. Для алюминиево-магниевого сплава наблюдается снижение температурных и концентрационных пределов воспламенения по сравнению с чистым алюминием. Этот факт объясняется, прежде всего, тем, что в покрывающей частицу сплава оксидной пленке наряду с Al_2O_3 содержится пористый оксид магнезия, уменьшающий защитные свойства всего оксида. Ограничение по использованию данного метода заключается в том, что для требуемого снижения пределов воспламенения необходимо добавлять к алюминию значительное количество магнезия ($\sim 10 \div 20\%$), а это приводит к снижению энергетических характеристик самого топлива.

Один из возможных путей интенсификации процесса воспламенения частиц алюминия заключается в их раскислении, в результате чего частицы реагируют с окружающей средой уже лишенными оксидной пленки. Для этого исходные частицы алюминия нагревают в инертной атмосфере (до $\sim 800 \div 900$ К) [4], что может быть описано химической реакцией $Al_2O_3 + Al \rightarrow AlO$. При поступлении в окислительную среду такие частицы практически мгновенно воспламеняются, создавая опасность взрыва смеси. Поэтому очевидно, что использование раскисленного Al в практических целях сопряжено с целым рядом трудностей, связанных с условиями безопасности его производства, транспортировки, а также с надежностью рабочего процесса в топках и камерах сгорания.

Свободным от вышеперечисленных недостатков является метод капсулирования частиц специально подобранными химическими элементами или органическими соединениями. В процессе нагрева капсулированной частицы достаточно тонкое покрытие препятствует (до определенного момента) окислению основного металла и, следовательно, образованию на поверхности последнего Al_2O_3 . Так, капсулирование частиц фторсодержащими органическими соединениями приводит к увеличению в 1,5–2 раза скорости распространения пламени w_f по аэровзвеси данного модифицированного ПА [5]. Повышение реакционной способности алюминия происходит за счет выделяющегося при разложении покрытия атомарного фтора, который вызывает нарушение сплошности оксидной пленки на поверхности Al и увеличивает тепловой эффект химических реакций окисления алюминия.

Известен также метод капсулирования, заключающийся в нанесении на поверхность частиц покрытий на основе металлов, замещающих оксидную пленку алюминия. При этом формирование покрытия может происходить, в частности, за счет химического осаждения металла на частицу, с поверхности которой предварительно удаляется оксидная пленка [6, 7]. Данный способ модификации ПА использован в [8], где при определении характеристик горения алюминизированного смесового твердого топлива зафиксировано повышение скорости горения заряда и уменьшение размеров агломератов частиц конденсированных продуктов сгорания за счет капсулирования частиц ПА никелем, железом и медью.

Цель настоящей работы — исследование особенностей процесса воспламенения и распространения пламени в аэровзвеси частиц алюминия, капсулированных методом химического никелирования [6]. Одна из причин выбора никеля в качестве материала покрытия обусловлена его коррозионной стойкостью, что способствует предохранению основного ме-

Таблица 1

Тип ПА	z_p	d_{ij} , мкм					δ_1 , Å
		d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{32}	d_{43}	
АСД-1	0	6,2	7,6	9,7	15,5	22,5	—
	0,011	6,4	8	10,1	15,9	22,1	57
	0,02	6,5	8,1	10,1	15,9	22,6	110
	0,032	6,2	7,7	9,8	15,5	21,9	180
АСД-4	0	5,2	5,7	6,3	7,8	9,9	—
	0,01	5,2	5,8	6,5	8,2	10,2	60

талла от окисления в нормальных условиях и на начальной стадии прогрева. Технология капсулирования обеспечивает осаждение никеля на поверхность алюминия тонкой, хорошо скрепленной с ним пленкой [7]. Заметим, что в процессе работы с модифицированным порошком не было обнаружено уменьшения содержания активного алюминия, что также свидетельствует о достаточной сплошности и хорошей адгезии покрытия.

В данной работе для модификации использовался ПА марок АСД-1 и АСД-4. Для каждого образца исходного и капсулированного ПА проводился кондуктометрический дисперсный анализ. Установлено, что процесс модификации ПА практически не оказывает влияния на дифференциальное и интегральное распределения частиц по размеру. Это обстоятельство наглядно иллюстрирует табл. 1, в которой в зависимости от массовой доли покрытия z_p представлены среднестатистические диаметры: d_{10} — среднесчетный, d_{20} — среднеповерхностный, d_{30} — среднеобъемный, d_{32} — диаметр Заутера, d_{43} — среднемассовый.

Используя данные дисперсного анализа, также представляется возможным определить толщину никелевого покрытия δ_1 исходя из величины z_p , под которой будем понимать отношение суммарной массы покрытия к массе совокупности частиц алюминия:

$$z_p = 3\rho_1\delta_1 \int r_p^2 \gamma(r_p) dr_p / \rho_2 \int r_p^3 \gamma^0(r_p) dr_p,$$

где ρ — плотность; γ^0 , γ — функции плотности распределения исходного и капсулированного ПА по радиусу частиц r_p . Здесь и далее подстрочные цифровые индексы обозначают: 1 — никель, 2 — алюминий. Как видно из табл. 1, толщина покрытия увеличивается пропорционально z_p и соизмерима с толщиной оксидной пленки на поверхности алюминия при нормальных условиях [9].

В качестве параметра, по которому оценивалось влияние капсулирования на воспламеняемость алюминия, принято значение скорости распространения пламени в аэровзвеси частиц ПА. Эксперименты выполнялись при атмосферном давлении на установке постоянного объема [10] по методике, подробно изложенной в работах [5, 10]. Напомним только, что пламя перемещается от открытого конца вертикально расположенной трубы к закрытому, а продукты сгорания отводятся в ресивер, благодаря чему реализуется ламинарный режим распространения пламени.

Проведенные исследования показали, что капсулирование частиц ПА никелем приводит к увеличению скорости распространения пламени w_f в 1,5–4 раза в диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha = 0,27 \div 0,54$. Причем зависимость $w_f(z_p)$ имеет максимум при $z_p = 0,02$ (рис. 1). Интенсификация процесса воспламенения аэровзвеси мо-

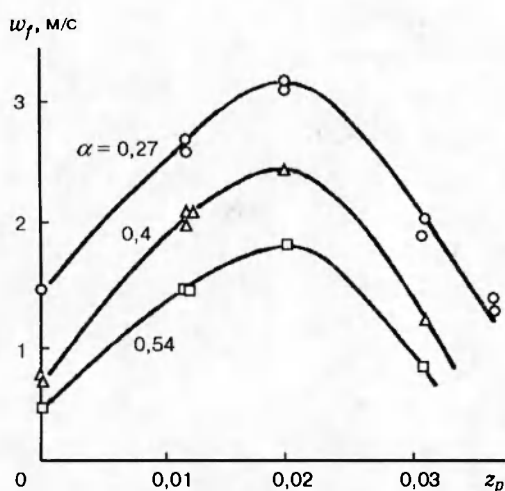


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени от массовой доли покрытия

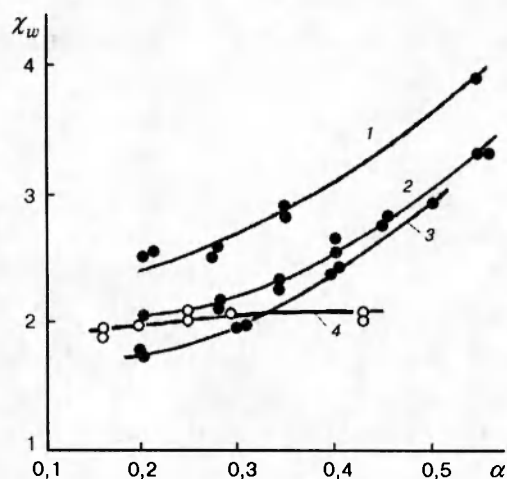


Рис. 2

Рис. 2. Относительное увеличение скорости распространения пламени:

1 — АСД-1+Ni, $z_p = 0,02$; 2 — АСД-1+Ni, $z_p = 0,011$; 3 — АСД-4+Ni, $z_p = 0,01$; 4 — АСД-4+ПМФА, $z_p = 0,04$ [5]

жет быть объяснена исходя из следующих соображений. Никель, обладая высокими коррозионной стойкостью и жаропрочностью, препятствует окислению алюминия на начальной стадии прогрева. Заметим, кстати, что скорость окисления самого никеля на воздухе невелика вследствие значительной энергии активации (173 кДж/моль [11]; для сравнения: у алюминия эта величина составляет 70 кДж/моль [9]). Учитывая это, а также тот факт, что теплота сгорания никеля меньше, чем у алюминия, влияние тепловыделения при взаимодействии никеля с кислородом на ускорение воспламенения можно не учитывать. Однако при сопоставлении коэффициентов объемного расширения β никеля и алюминия видно, что в интервале температур $T = 300 \div 950$ К, который соответствует переходу алюминия в расплавленное состояние, $\beta_1 = 46,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\beta_2 = 85,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [12]. Поэтому при нагреве в никелевой оболочке возникают термические напряжения.

В определенный момент времени термические напряжения в покрытии, обусловленные двукратным превышением β_2 по сравнению с β_1 , становятся больше предела прочности никелевой оболочки, что может привести к ее растрескиванию, потере защитных свойств и, наконец, к отслоению от поверхности частицы. После этого вероятен переход ко второй стадии воспламенения, когда алюминий начинает реагировать с окислителем практически раскисленным (лишенным защитной оксидной пленки). В результате этих микропроцессов длительность стадии воспламенения в целом уменьшается. Подтверждением этому служат результаты работы [4], в которой зарегистрировано практически мгновенное воспламенение предварительно раскисленных частиц алюминия на воздухе при комнатной температуре.

На основе изложенного экстремальный характер зависимости $w_f(z_p)$ связан, по мнению авторов, с увеличением прочностных характеристик покрытия по мере роста его толщины, и при $z_p > 0,02$ термические напряжения, обусловленные различием коэффициентов объемного расширения Al и Ni, уже не приводят к полному разрушению покрытия

и оголению поверхности основного металла.

Для сравнительной оценки эффективности капсулирования введем относительное увеличение скорости пламени $\chi_w = w_f/w_f(z_p = 0)$. Как видно из рис. 2, с ростом α значение χ_w и, следовательно, эффективность модифицирования исходного ПА увеличиваются. Полученный результат можно объяснить тем, что при низких значениях α увеличивается время индукции воспламенения частиц алюминия, главным образом за счет снижения темпа нагрева частиц после отслоения никелевого покрытия (мала концентрация окислителя). Причем для ПА различной дисперсности (базовые партии АСД-1 и АСД-4) темп увеличения χ_w почти один и тот же, поскольку практически одинакова толщина никелевого покрытия на частицах обоих типов ПА (см. табл. 1).

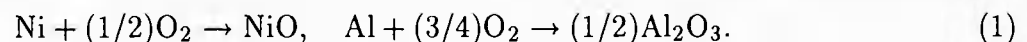
Для сравнения на рис. 2 нанесена зависимость $\chi_w(\alpha)$ для ПА марки АСД-4, капсулированного фторсодержащими органическими соединениями на основе полиметилфторакрилата (ПМФА) [5]. В этом случае эффективность модифицирования меньше, поскольку покрытие из ПМФА предохраняет алюминий от окисления только на стадии начального прогрева (до ~ 1000 К). В остальном же процесс воспламенения ПА протекает по обычному механизму.

Представленные результаты позволяют считать, что одним из основных параметров, определяющих эффективность капсулирования, является температура частицы T_* , при которой происходит нарушение защитных свойств покрытия из-за растрескивания или отслоения. В связи с этим для изучения особенностей указанных процессов, а также для подтверждения физико-химических предпосылок увеличения скорости пламени разработана математическая модель воспламенения отдельной капсулированной никелем частицы алюминия.

Наряду с общепринятыми допущениями в теории воспламенения одиночных частиц [9] примем следующие.

1. Градиент температур по толщине покрытия и радиусу частицы отсутствует.
2. Никелевое покрытие сплошное, и диффузия окислителя через него к поверхности алюминия отсутствует.
3. Необходимым условием разрушения покрытия является превышение возникающих в нем эквивалентных напряжений σ' предела прочности материала покрытия σ_{st} .

Будем также считать, что на границе раздела газ — поверхность частицы на соответствующих стадиях воспламенения имеют место следующие экзотермические реакции:



Принимая во внимание вышеизложенное, уравнения баланса энтальпии частицы, массы алюминия и никеля в покрытии и массы образующихся на их поверхностях оксидов запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum H_i) &= \sum Q, & \sum H_i &= \begin{cases} 4\pi r_p^2 T_p (r_p c_2 \rho_2 + \delta_{13} c_{13} \rho_{13}), & T_p \leq T_*, \\ 4\pi r_p^2 T_p (r_p c_2 \rho_2 + \delta_{23} c_{23} \rho_{23}), & T_p > T_*, \end{cases} \\ \frac{dm_i}{dt} &= -I, & m_i &= \begin{cases} m_1 = 4\pi r_p^2 \delta_{13} \rho_{13}, & dm_2/dt = 0, & T_p \leq T_*, \\ 4/3\pi r_p^3 \rho_2, & dm_1/dt = 0, & T_p > T_*, \end{cases} \\ \frac{dm_{i3}}{dt} &= \frac{I}{\nu_i}, & m_{i3} &= \begin{cases} m_{13} = 4\pi r_p^2 \delta_{13} \rho_{13}, & m_{23} = 0, & T_p \leq T_*, \\ m_{23} = 4\pi r_p^2 \delta_{23} \rho_{23}, & & T_p > T_*, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где δ — толщина покрытия или оксидной пленки; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность. Для обозначения компонентов дополнительно введены следующие индексы: 13 — оксид никеля, 23 — оксид алюминия, 3 — кислород.

Массовые стехиометрические коэффициенты ν_{12} и ν_{23} вычисляются по соответствующим коэффициентам реакций (1): $\nu_{12} = \mu_1/\mu_{13}$, $\nu_{23} = 2\mu_{23}/\mu_2$, где μ — относительная молекулярная масса никеля, алюминия и их высших оксидов.

Суммарный поток тепла, обусловленный кондуктивным, радиационным теплообменом частицы с окружающей средой и тепловыделением в результате химической реакции, можно записать в виде

$$\sum Q = 4\pi r_p \text{Nu} \lambda (T - T_p) + 4\pi r_p^2 \varepsilon \sigma (T^4 - T_p^4) + I \Delta H_i.$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности газа; Nu — критерий Нуссельта; ε , σ — коэффициент интегральной излучательной способности поверхности частицы и постоянная Стефана — Больцмана; ΔH_i — тепловые эффекты химических реакций (1).

Суммарные потоки масс Al и Ni определяются в предположении параболического закона окисления никеля [11] и линейного закона окисления алюминия при $T > 800$ К [14]:

$$I = \begin{cases} \nu_{13} 4\pi r_p^2 k_1 m_{O_2} / \delta_{13} \exp(-\varepsilon_1 / R_\mu T_p), & T_p \leq T_*, \\ \nu_{23} 4\pi r_p^2 k_2 m_{O_2} \exp(-\varepsilon_2 / R_\mu T_p), & T_p > T_*, \end{cases}$$

где $k_1 = 3,8 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $k_2 = 10^4$ м/с, $\varepsilon_1 = 173$ кДж/моль, $\varepsilon_2 = 70$ кДж/моль — предэкспоненциальные множители и энергии активации химических реакций (1); m_{O_2} — относительная массовая концентрация кислорода в воздухе.

Для определения момента отслоения никелевого покрытия решается задача о возникновении в процессе нагрева частицы механических напряжений за счет разности коэффициентов объемного расширения алюминия и никеля. При расчете в покрытии эквивалентного напряжения σ' используется система уравнений, описывающая нагружение полой сферы внутренним давлением на границе раздела частица — покрытие [13]:

$$\sigma' = \frac{(r_p + \delta_1)^3 (T_p - T_p^0) (\beta_2 - \beta_1)}{2 \left[r_p^3 \left((1 - 2\gamma_1) / E_1 - (1 - 2\gamma_2) / E_2 \right) + (r_p + \delta_1)^3 \left((1 - 2\gamma_2) / E_2 + (1 + \gamma_1) / 2E_1 \right) \right]},$$

где T_p^0 — температура частицы в начальный момент времени; γ_1 , γ_2 — коэффициенты Пуассона; E_1 , E_2 — модули упругости Юнга для никеля и алюминия соответственно.

Алгоритм численного решения уравнений предусматривает определение температуры конденсированной частицы в зависимости от времени, проверку условия отслоения никелевого покрытия ($\sigma' \geq 2,5\sigma_{st} = 1400$ МПа [12]) и расчет второй (заключительной) стадии воспламенения частицы алюминия вплоть до перехода к парофазному горению. В качестве критерия последнего принимается условие достижения частицей температуры плавления оксидной пленки Al_2O_3 ($T_p = 2300$ К), поскольку при этом резко снижаются ее диффузионное сопротивление и прочностные свойства [9].

Результаты расчета по предложенной модели представлены на рис. 3–5. Необходимые при этом термокинетические константы и физико-механические свойства никеля, алюминия и их высших оксидов заимствованы из публикаций [9, 11–14]. Полученная зависимость эквивалентного напряжения от времени (см. рис. 3) позволяет определить длительность первого этапа воспламенения (от начала нагрева частицы до отслоения покрытия). Очевидно, что с увеличением температуры окружающей среды T_∞ момент разрушения по-

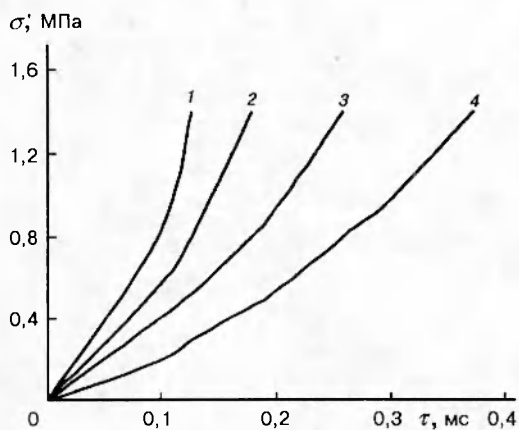


Рис. 3

Рис. 3. Эквивалентные напряжения в никелевом покрытии:
 $r_p = 14$ мкм; T_∞ , К: 1 — 3000, 2 — 2800, 3 — 2600, 4 — 2400

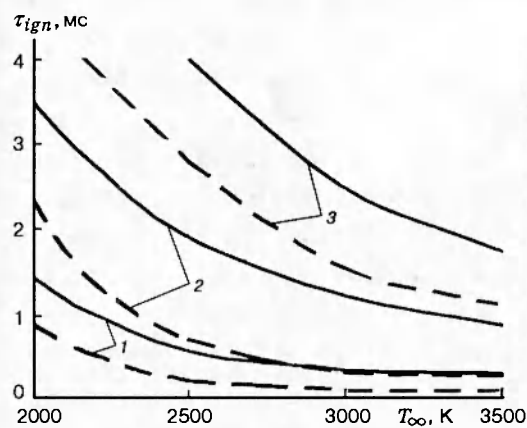


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость суммарного периода индукции от температуры окружающей среды:
 сплошные линии — $z_p = 0$, штриховые — 0,011; r_p , мкм: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 14

крытия наступает быстрее. Причем температура частицы в момент отслоения покрытия не зависит от температуры окружающей среды и радиуса частиц и составляет ~ 1000 К. Отметим, что эта величина лежит между значениями температур плавления алюминия (933 К) и никеля (1728 К), которые могут использоваться в качестве оценки нижней и верхней временных границ разрушения покрытия.

После разрушения покрытия проводится расчет процесса воспламенения частицы, описываемого уравнениями системы (2), справедливыми при $T_p > T_*$. Зависимости суммарного периода индукции τ_{ign} (включая время до отслоения покрытия) от T_∞ представлены на рис. 4. С увеличением T_∞ и уменьшением r_p период индукции уменьшается, что соответствует результатам экспериментально-теоретических исследований [9, 14].

Полученные данные использованы для оценки эффективности влияния капсулирования на величину τ_{ign} . Для этого проведен дополнительный расчет характеристик процесса воспламенения некапсулированной частицы алюминия, на поверхности которой имеется только оксидная пленка Al_2O_3 . Относительное уменьшение длительности периода индук-

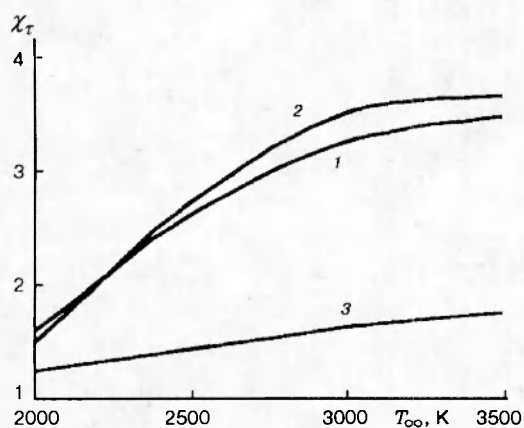


Рис. 5. Относительное уменьшение периода индукции воспламенения (обозначения те же, что на рис. 4)

Таблица 2

p, МПа	T*, К при z _p				
	0	0,011	0,02	0,032	0,037
0,1	3536	3533	3528	3527	3526
0,3	3707	3704	3698	3697	3695
1	3905	3902	3849	3893	3891

ции представлено на рис. 5 в виде зависимости $\chi_T(T_\infty, r_p)$, где $\chi_T = \tau_{ign}(z_p = 0)/\tau_{ign}$. Видно, что с увеличением температуры окружающей среды возрастает эффективность микрокапсулирования в достаточно широком диапазоне размеров частиц. Это происходит за счет уменьшения длительности второй стадии воспламенения (после отслоения покрытия). Причем для частиц радиусами 5 и 10 мкм значения χ_T практически одинаковы, что согласуется с результатами эксперимента при исследовании модифицированных ПА марок АСД-1 и АСД-4 (см. рис. 2).

Поскольку анализ влияния модификатора на характеристики горения ПА представляет определенный практический интерес, в данной работе проведены термодинамические расчеты равновесных параметров горения алюминиево-воздушной смеси стехиометрического состава ($\alpha = 1$). В качестве критерия сравнения используется термодинамическая температура горения T^* . Как следует из данных табл. 2, при увеличении z_p до 3,7% значение T^* уменьшается не более чем на 0,3% при $p = 0,1 \div 1$ МПа. Это происходит вследствие уменьшения доли активного алюминия за счет никеля, обладающего меньшей теплотой сгорания в кислороде (31 и 4,1 МДж/кг соответственно). Представленные результаты позволяют заключить, что нанесение никелевых покрытий, имеющих оптимальную толщину, не может привести к сколько-нибудь значительному снижению энергетических характеристик технологических устройств и энергетических установок.

Таким образом, капсулирование ПА никелем позволяет увеличить его реакционную способность в 1,5–4 раза за счет снижения периода индукции воспламенения, связанного с сокращением времени прогрева частиц после отслоения никелевого покрытия. Разработанная модель подтверждает описанный выше механизм влияния микрокапсулирования на процесс распространения пламени в зависимости от дисперсности частиц алюминия и соотношения компонентов в рабочем участке. Результаты гранулометрического анализа и термодинамического расчета позволяют заключить, что капсулирование частиц ПА практически не изменяет дисперсных и энергетических характеристик алюминиево-воздушной смеси.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В. И. Шевцову за помощь в проведении дисперсного анализа и обсуждение актуальных проблем воспламенения и горения газодисперсных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин Л. Ф., Городынский А. В., Сахаренко В. А. Повышение реакционной способности алюминия к воде и ее связь с твердофазными превращениями алюминия в процессе сплавообразования с галлием, оловом и индием // Химическая физика процессов горения и взрыва. Кинетика и горение. Черноголовка, 1986. С. 9–13.

2. Попов Е. И., Кашпоров Л. Я., Мальцев В. М. О механизме горения частиц алюминиево-магниевых сплавов // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 2. С. 240–246.
3. Попов Е. И., Брейтер А. Л., Великанова В. Л. Исследование воспламеняемости дисперсных металлов и сплавов // Физика аэродисперсных систем. 1986. Вып. 29. С. 33–37.
4. Попов Е. И. Влияние окисленности металлов на их воспламеняемость // Предупреждение внезапных воспламенений порошков и взрывов газодисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1975. С. 141–146.
5. Ягодников Д. А., Воронежский А. В., Мальцев В. М., Селезнев В. А. О возможности увеличения скорости распространения фронта пламени в аэровзвеси алюминия // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 51–54.
6. Егорова Л. Г., Сахиев А. С., Бассель А. Б. и др. Химическое никелирование дисперсного алюминия // Защита металлов. 1975. Т. 11, № 4. С. 505–506.
7. Кудрявцев Н. Т., Головчанская Р. Г., Гаврилина Л. П. Химическое никелирование алюминия и его сплавов // Защита металлов. 1969. Т. 5, № 2. С. 174–176.
8. Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И. Пути модификации металлического горючего конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 97–104.
9. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
10. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронежский А. В. и др. Исследование высокотемпературных двухфазных потоков // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Харьков: ХАИ, 1983. Вып. 3. С. 79–84.
11. Gulbransen E. A., Andrew K. F. The kinetics of oxidation of high purity nickel // J. Electrochem. Soc. 1954. V. 101, N 3. P. 128–140.
12. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
13. Розенбанд В. И., Ваганова Н. И. Прочностная модель гетерогенного воспламенения частиц металлов // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 1. С. 3–9.
14. Гуревич М. А., Озеров Е. С., Юринов А. А. О влиянии пленки окисла на характер воспламенения алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 4. С. 50–55.

*Поступила в редакцию 3/1 1996 г.,
в окончательном варианте — 26/IV 1996 г.*
