

06

Влияние СВЧ-излучения на термическую стабильность нанопорошка алюминия

© А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, П.Ю. Чумерин, Ю.Г. Юшков,
В.А. Ваулин, Б.А. Алексеев

Томский политехнический университет
E-mail: pasembellum@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2015 г.

Исследовано влияние СВЧ-излучения с плотностью мощности потока 80 W/cm^2 и несущей частотой 9.4 GHz на термическую стабильность нанопорошка алюминия после облучения в воздухе. Установлено, что после облучения нанопорошка алюминия увеличивается его химическая активность, а также уменьшается температура начала окисления на 40°C и снижается тепловой эффект окисления на 13.5% .

В настоящее время одним из важнейших направлений исследований наноматериалов (в том числе и нанопорошков) является изучение влияния различных высокоэнергетических воздействий на их структуру и свойства [1]. Установлено, что при облучении потоком ускоренных электронов происходит накопление энергии в нанопорошках металлов [2]. В то же время действие постоянного магнитного поля не приводит к каким-нибудь существенным изменениям в свойствах нанопорошка алюминия, но при действии на горящий в воздухе нанопорошок алюминия изменяется морфология продуктов сгорания [3]. Действие переменного электромагнитного поля на нанопорошки металлов, в частности, СВЧ-излучения мало изучено [1,4]. Целью данной работы являлось определение термической стабильности нанопорошка алюминия в воздухе после его облучения СВЧ-излучением.

В работе использовали слабоагломерированный нанопорошок алюминия, полученный с помощью электрического взрыва алюминиевого проводника в среде аргона. Для него характерно распределение частиц по диаметру, близкое к нормально-логарифмическому с максимумом 120 nm и асимметрией распределения в области крупных частиц, частицы обладают сферической формой. Содержание металлических примесей составляло не более $0.2 \text{ wt}\%$. Нанопорошок пассивировали

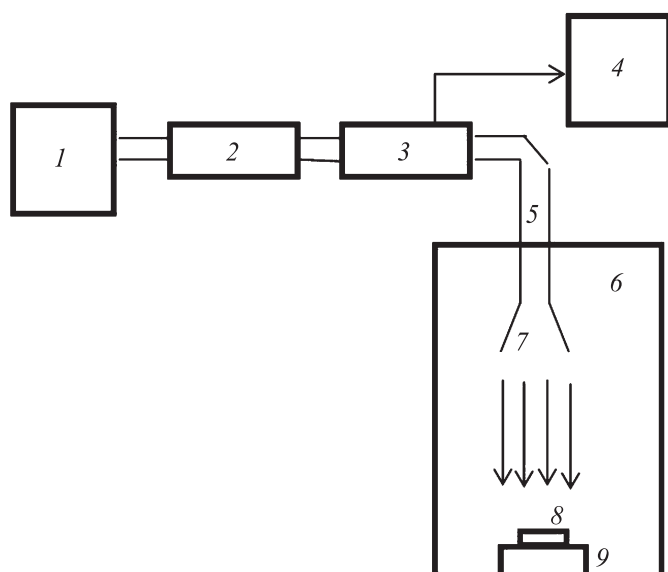


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для изучения действия СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия.

малыми добавками воздуха. Пассивированный нанопорошок подвергали дифференциально-термическому анализу с использованием термоанализатора SDT Q600 для определения параметров активности и стабильности нанопорошка в воздухе при нагревании. После пассивирования порошок стабилен в воздухе при нагревании до 400°C [5]. Металлический порошок, полученный в процессе электрического взрыва и последующего пассивирования, имеет на поверхности оксидно-гидроксидный слой, который стабилизируется двойным электрическим слоем (ДЭС) [6], способным накапливать энергию [2]. Кроме того, с ДЭС связана стабильность наночастиц в воздухе, а также он обуславливает параметры их химической активности.

Для исследования влияния СВЧ-излучения на устойчивость нанопорошка алюминия был разработан экспериментальный стенд (рис. 1), включающий в себя источник СВЧ-излучения на базе магнетронного генератора 3-сантиметрового диапазона длин волн 1 и безэховую

№	Время облучения, s	Энергия СВЧ-излучения, J	$T_{s.o.}$, °C	ΔH , J/g	Δm , wt %
0	0	0	420	6750	53.7
1	5	12	390	9122	65.4
2	10	24	370	8375	61.6
3	15	36	400	7649	63.5
4	20	48	350	8268	62.2
5	25	60	350	8037	65.2

камеру 6, антенно-фидерную систему, включающую ферритовый вентиль 2, направленный ответвитель 3 и волноводный тракт 5, рупорную антенну 7. Облучаемый порошок 8 размещали в виде тонкого слоя (толщиной 2 mm) на диэлектрической подложке из оксида алюминия 9, являющегося „оптически прозрачным“ для СВЧ-излучения на этих частотах [7]. Для контроля и измерения параметров импульсов излучения использован осциллограф DS 091204 A (4). Безэховая камера имела коэффициент поглощения электромагнитного излучения 26–27 dB. В рабочей зоне камеры на расстоянии до 0.5 m от излучающей антенны располагался объект исследования. В качестве антенны использовался волноводный рупор 3-см диапазона длин волн.

В эксперименте проводили измерения плотности потока мощности на объекте с помощью измерителя ПО-01. Длительность и частоту повторения импульсов измеряли с помощью осциллографа. Обеспечивались следующие параметры излучения в области размещения образца: поток с плотностью мощности 80 W/cm^2 , длительность импульса $3 \mu\text{s}$, частота следования импульсов 400 Hz, несущая частота излучения 9.4 GHz. Облученный нанопорошок алюминия исследовали с помощью метода дифференциально-термического анализа для определения изменения параметров химической активности нанопорошка алюминия. Образцы подвергали действию излучения от 5 до 25 s, шаг по времени составлял 5 s, интегральное значение энергии, излученной в виде СВЧ-излучения антенным рупором на образец, лежало в диапазоне от 12 до 60 J.

В таблице представлены результаты расчета основных параметров химической активности нанопорошка алюминия после облучения

2* Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 7

СВЧ-излучением: температура начала окисления ($T_{s.o}$), тепловой эффект окисления (ΔH), прирост массы после окисления нанопорошка (Δm).

На рис. 2 представлены термограммы нанопорошка алюминия после облучения в течение 5 и 25 s (обозначения: 1 — изменение массы, 2 — тепловой поток, 3 — разность температур между образцом и внутренним эталоном термоанализатора). Сравнение этих термограмм между собой является более корректным, чем сравнение с другими термограммами, так как прирост массы после окисления нанопорошка алюминия в обоих случаях составляет примерно 65 wt%. Таким образом, при окислении примерно одинакового количества алюминия возникает существенное различие в тепловом эффекте: при более длительном облучении нанопорошка алюминия тепловой эффект снизился на 13.5%, кроме того, температура начала окисления уменьшилась с 390 до 350°C. Вместе с тем относительно необлученного порошка (образец № 0 в таблице) воздействие СВЧ-излучения приводит к снижению температуры начала окисления и к увеличению степени окисленности алюминия (прирост массы образцов № 1 и 5 выше примерно на 12% в сравнении с образцом № 0, а температура начала окисления ниже на 30 и 70°C соответственно), что свидетельствует об увеличении химической активности нанопорошка алюминия.

Таким образом, СВЧ-излучение влияет на термическую стабильность нанопорошка алюминия: происходит снижение теплового эффекта окисления на 13.5% и уменьшение температуры начала окисления на 40°C — т.е. увеличивается химическая активность нанопорошка алюминия. Вероятно, это является следствием деструкции ДЭС на поверхности частицы, что приводит к более свободному доступу окислителя (протонов) к металлической составляющей наночастицы. Предположительным механизмом влияния СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия является тепловой нагрев металлической составляющей наночастицы, приводящий к разрушению ДЭС на поверхности наночастицы и, как следствие к дополнительному окислению металлической составляющей, что приводит к снижению теплового эффекта окисления. Дополнительным подтверждением деструкции ДЭС и уменьшения его термической стабильности является снижение температуры начала окисления.

Воздействие СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия приводит к уменьшению величины запасенной в нанопорошке алюминия энергии

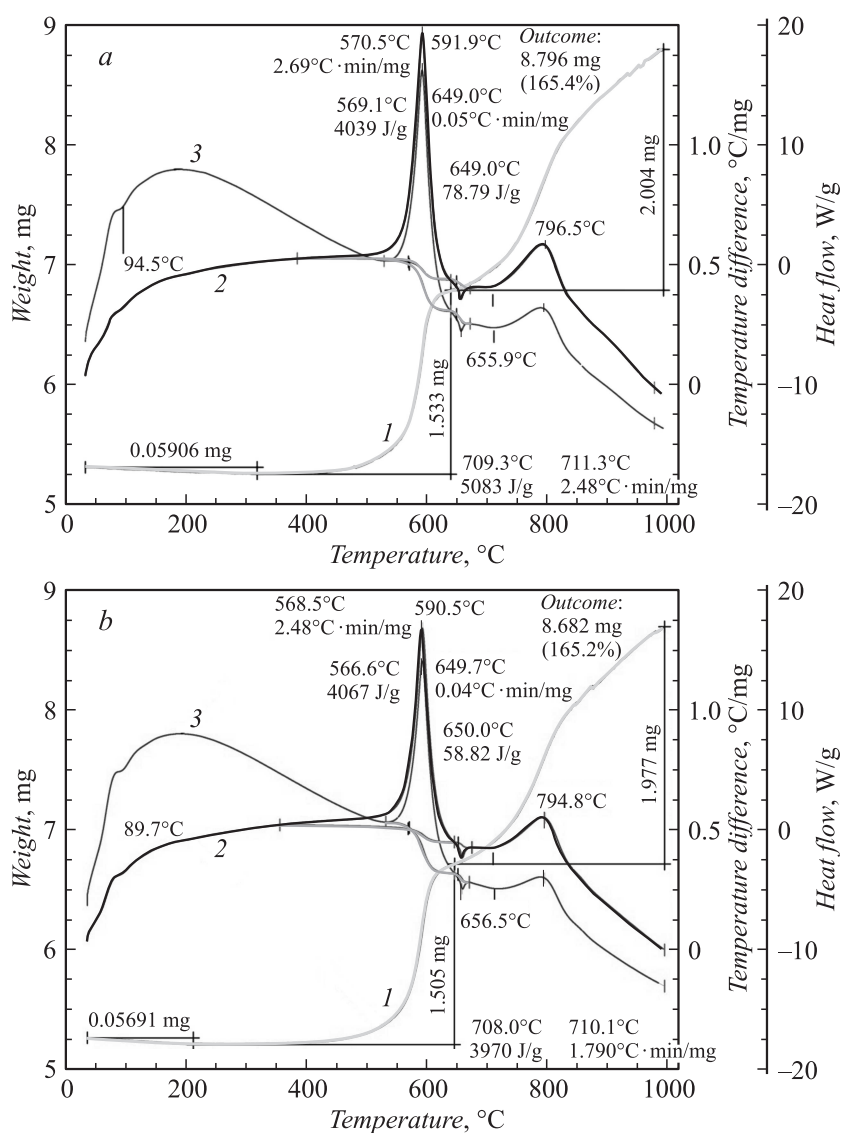


Рис. 2. Термограммы нанопорошка алюминия после облучения в течение 5 s (a) и 25 s (b).

по причине окисления металлической составляющей наночастиц, а снижение термической стабильности происходит по причине деструкции ДЭС. Следовательно, действие СВЧ-излучения должно приводить к снижению характеристик металлосодержащих высокоэнергетических материалов [8].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ, проект № 15-03-05385.

Список литературы

- [1] Андриевский Р.А. // Наноструктуры в экстремальных условиях // УФН. 2014. Т. 184. № 10. С. 1017–1032.
- [2] Ильин А.П., Роот Л.О., Мостовщиков А.В. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 8. С. 140–142.
- [3] Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Роот Л.О. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 20. С. 49–53.
- [4] Морохов И.Д., Петинов В.П., Трусов Л.И., Петрунин В.Ф. // УФН. 1981. Т. 133. № 4. С. 653–691.
- [5] Ильин А.П., Громов А.А., Яблуновский Г.В. // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 4. С. 58–62.
- [6] Хауфффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. Т. 2. 276 с.
- [7] Вакуумная СВЧ электроника: Сб. обзоров. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2002. 160 с.
- [8] Beckstead M. W. A Summary of Aluminum Combustion, RTO/VKI Special Course on Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion, 2004, RTO-EN-023.