

УДК 544.452.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВАЦИИ КОМПАКТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПИРОФОРНЫХ НАНОПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОЗДУХОМ

М. И. Алымов, Б. С. Сеплярский, С. Г. Вадченко, Р. А. Кочетков,  
Н. И. Абзалов, Н. М. Рубцов, И. Д. Ковалев, В. А. Зеленский, Ф. Ф. Галиев

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН  
142432 Черноголовка, seplb1@mail.ru

Проведено исследование различных макрокинетических режимов взаимодействия (самовоспламенение или горение) компактных образцов из непассивированных (пирофорных) и пассивированных нанопорошков железа с воздухом. Эксперименты показали, что режимы взаимодействия с воздухом зависят от типа используемой газообразной среды (аргон или воздух), в которой предварительно находились бюксы с образцами, а также от длительности нахождения бюксов на воздухе. Впервые экспериментально установлена возможность пассивации пресствованных образцов из пирофорного нанопорошка железа при нахождении бюксов с образцами на воздухе. Различными экспериментальными методами изучена динамика разогрева образца и влияние на нее неоднородности плотности по длине образца. Установлено, что разогрев пирофорных образцов имеет неоднородный характер, хотя начинается одновременно по всей поверхности образца.

Ключевые слова: пирофорные нанопорошки железа, компактные образцы, воздух, взаимодействие, пассивация, разогрев.

DOI 10.15372/FGV20210307

### ВВЕДЕНИЕ

Нанопорошки металлов являются пирофорными, т. е. способны самовоспламеняться при контакте с воздухом из-за высокой химической активности и большой удельной поверхности [1–4]. Для того чтобы сделать безопасным процесс дальнейшей переработки нанопорошков в изделия, их пассивируют [3–7]. Путем пассивации создается тонкая защитная пленка на поверхности наночастиц, которая препятствует их самовозгоранию. Особенности пассивации нанопорошков алюминия посвящено множество работ (см. [8–10] и библиографию в них). Проводились также исследования процессов пассивации нанопорошков железа и никеля в [11–16].

Однако существуют ситуации, когда проведение пассивации невозможно или нежелательно, хотя технические операции с нанопорошками и компактными изделиями из них необходимо провести. Поэтому актуальной за-

дачей является исследование самовоспламенения и саморазогрева компактированных образцов из непассивированных нанопорошков, разработка новых способов получения компактных изделий из нанопорошков, позволяющих обеспечивать требуемый уровень пожаровзрывобезопасности.

Литературные данные о закономерностях самовоспламенения и саморазогрева компактированных образцов из непассивированных (пирофорных) нанопорошков довольно ограничены. Так, в работах [17, 18] по исследованию зажигания наносистем с размерами частиц реагентов  $40 \div 80$  нм показано, что в этих случаях температура и энергия зажигания могут быть значительно ниже, чем в смесях микропорошков ( $1 \div 100$  мкм).

В [19] исследованы особенности распространения пламени по таблеткам из смесей нанопорошков Al/CuO (так называемые нанотермиты) в зависимости от их плотности при лазерном инициировании горения. Установлено, что менее плотные образцы (пористость 90 %) воспламеняются быстрее и скорость распространения пламени в них на порядок выше, чем в более плотных образцах (пористость 50 %).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-13-00013П).

© Алымов М. И., Сеплярский Б. С., Вадченко С. Г., Кочетков Р. А., Абзалов Н. И., Рубцов Н. М., Ковалев И. Д., Зеленский В. А., Галиев Ф. Ф., 2021.

Эти результаты, по мнению авторов [19], указывают на изменение механизма горения с возрастанием плотности компактированного образца — от конвективного к диффузионному. Аналогичные измерения проводились с образцами нанопорошков Al/MoO<sub>3</sub>, полученные результаты изложены в монографии [20] и качественно сходны с [19].

В настоящей работе экспериментально исследованы закономерности взаимодействия компактных образцов различного диаметра (5, 7 и 10 мм) из пиррофорных нанопорошков железа с воздухом.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе для экспериментального исследования процессов воспламенения и пассивации использовали нанопорошки железа, полученные химико-металлургическим методом. Главными стадиями синтеза металлического нанопорошка являются осаждение гидроксида металла, сушка и восстановление [14]. Синтез гидроксида железа выполняли гетерофазным взаимодействием твердой соли металла с раствором щелочи. После осаждения гидроксида железа его сначала промывали в воронке Бюнера до pH = 7 и затем сушили на воздухе до пыления. Для получения металлического нанопорошка порошок гидроксида железа восстанавливали в печи в течение 1 ч при температуре 400 °С в потоке водорода в реакторе; затем реактор извлекали из печи и охлаждали на воздухе до 20 °С в потоке аргона. Порошки после изготовления хранили в герметичном боксе в среде аргона чистотой 99.987 % (об.). Средний диаметр наночастиц, рассчитанный по удельной площади поверхности порошка, составлял 85 нм. Удельную площадь поверхности наночастиц железа определяли методом БЭТ. Внешний вид полученных наночастиц железа по данным электронной микроскопии представлен на рис. 1. После изготовления порошки обладают пиррофорными свойствами, которые сохраняются в течение 2 ÷ 5 суток, если боксы с порошками находились при отрицательных температурах –20 ÷ –25 °С (в морозильной камере холодильника) [13].

Вскрытие сосудов с нанопорошком и последующее прессование образцов проводили в экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 2. Установка позволяет получать компактные изделия даже из пиррофор-

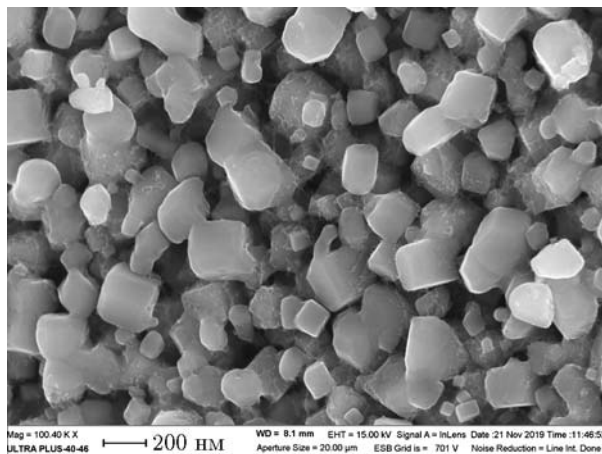


Рис. 1. Микрофотографии нанопорошка железа



Рис. 2. Общий вид установки для получения компактных образцов изделия внутри герметичного бокса:

1 — шлюз, 2 — пресс, 3 — выход на анализатор кислорода, 4 — цифровые весы, 5 — перчатки, 6 — набор пресс-форм

ных (непассивированных) нанопорошков, так как все операции с нанопорошками, начиная от вскрытия сосудов с ними, их взвешивания и прессования, выполняли в герметичном боксе, заполненном инертным газом (аргоном) и снабженном шлюзом для смены порошков. Концентрацию кислорода в боксе контролировали анализатором АКПМ-1-02 (Россия). При открытии сосудов с порошком и прессовании образцов объемная концентрация кислорода в боксе не превышала 0.1 %. При такой концентрации кислорода нанопорошки оставались пиррофорными. Для проверки сохранения пиррофорных свойств нанопорошка после манипуляций в перчаточном боксе часть порошка насыпали

в бокс с притертой крышкой, который после извлечения из бокса открывали и высыпали порошок на воздухе. Порошок распылялся в воздухе, воспламенялся и горел, т. е. оставался пирофорным на протяжении всех подготовительных операций.

Из нанопорошка железа были получены и исследованы цилиндрические компактные образцы диаметром 5, 7 и 10 мм, длиной  $8 \div 11$  мм и плотностью  $3.0 \div 3.6$  г/см<sup>3</sup>. После прессования каждый образец прямо в боксе помещали в отдельный бокс и закрывали притертой крышкой. Бюксы с образцами помещали в пластиковую емкость и извлекали из бокса через шлюз. Непосредственно перед экспериментом бюкс доставали из пластиковой емкости и открывали. Затем цилиндрические образцы вынимали из бюкса и устанавливали вертикально на подложку из нитрида бора. Время от момента открытия бюкса до установки образца на подставку составляло  $3 \div 5$  с. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Для изучения изменения во времени температуры на поверхности образца и определения ее максимального значения в каждый момент времени использовали инфракрасную камеру FLIR E60 (60 кадр/с,  $320 \times 240$  пиксель, интервал чувствительности  $8 \div 14$  мкм). Для определения скорости горения (распространения реакции окисления по поверхности образцов) использовали видеокамеру SONY HDR-CX330. Изменение температуры на поверхности образца также контро-

лировалось двумя прокатанными термопарами толщиной 40 мкм, плотно касающимися боковой поверхности образца. Термопары были расположены на расстоянии 1 и 4 мм от нижнего торца образца.

В первой серии экспериментов для исключения окисления образцов еще до открытия бюксов в емкость с бюксами подавался аргон. После проведения первой серии экспериментов подача аргона в емкость с бюксами была прекращена. Через 20 мин после прекращения подачи аргона эксперименты продолжили по описанной выше методике. Результаты этой серии экспериментов использовались для определения возможностей бюксов с притертыми крышками для хранения пирофорных образцов на воздухе. Отрезок времени 20 мин выбран на основе результатов предварительных экспериментов, которые показали, что при выдержке бюксов на воздухе менее 15 мин компактные образцы оставались пирофорными.

Фазовый состав образцов изучали с помощью дифрактометра ДРОН-3М с использованием монохроматического Fe  $K_{\alpha}$ -излучения. Съемку дифрактограмм проводили в режиме шагового сканирования в интервале углов  $2\theta = 30 \div 100^\circ$  с шагом съемки  $0.2^\circ$ . Полученные дифрактограммы анализировали с использованием базы данных PDF-2. Микроструктура образцов после самовоспламенения и горения исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Ultra Plus фирмы Carl Zeiss.

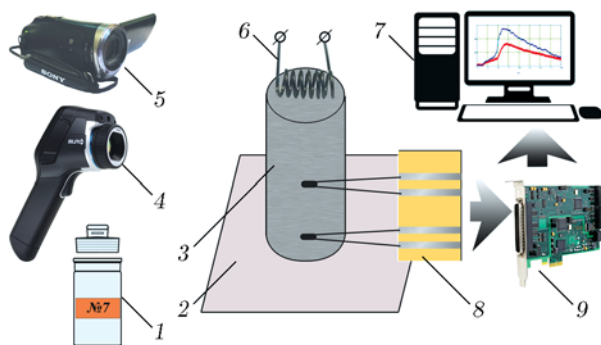


Рис. 3. Схема эксперимента по изучению динамики разогрева образцов на воздухе:

1 — бокс с компактным образцом после извлечения из бокса, 2 — подложка из нитрида бора, 3 — исследуемый образец, 4 — тепловизор FLIR E60, 5 — цифровая видеокамера, 6 — вольфрамовая спираль, 7 — компьютер для записи данных, 8 — контактная площадка с зафиксированными термопарами, 9 — аналого-цифровой преобразователь

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Известно, что при прессовании длинномерных образцов (длиной, в два раза превышающей диаметр) может наблюдаться неравномерность плотности и, следовательно, пористости по длине прессовки [21]. В соответствии с [21] наиболее плотная часть образца расположена со стороны подвижного (в нашем случае верхнего) пуансона. Как показали эксперименты, неравномерность плотности сказывается на динамике разогрева пирофорных образцов. Измерения распределения плотности по длине компактных пассивированных образцов проводились следующим образом. Образец предварительно взвешивался на аналитических весах, и измерялась его длина с точностью до 0.1 мм. Затем он фиксировался в специальной форме и послойно шлифовался. После этого снова определялись масса и длина оставшейся части об-

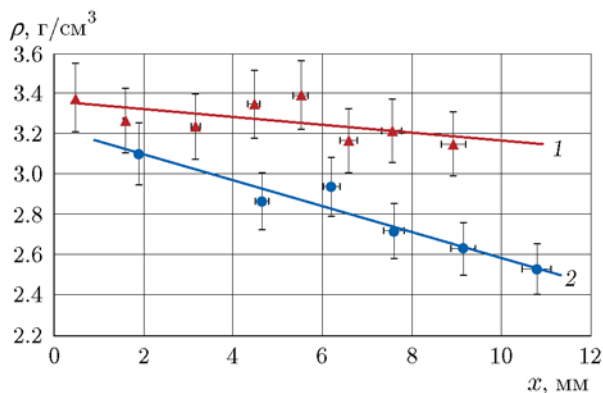


Рис. 4. Распределение плотности по длине компактных образцов различного диаметра:  
1 — диаметр 5 мм, 2 — диаметр 10 мм

разца и рассчитывалась плотность удаленной части.

Распределение плотности по длине компактных пассивированных образцов диаметром 5 мм (длина 11.6 мм, средняя плотность  $2.87 \text{ г/см}^3$ ) и 10 мм (длина 9.74 мм, средняя плотность  $3.25 \text{ г/см}^3$ ) показано на рис. 4. Как видно из рисунка, отличие плотностей верхнего и нижнего концов образца диаметром 5 мм составляет  $0.57 \text{ г/см}^3$ , т. е. 20 % от средней плотности образца.

Для образца диаметром 10 мм отличие максимального и минимального значений плотности равно  $0.24 \text{ г/см}^3$ , т. е.  $\approx 7\%$  от средней плотности образца, что близко к погрешности измерения 5%. Поэтому можно говорить об однородности плотности по длине образца.

### Первая серия экспериментов

В этих экспериментах в емкость с бюксами подавался аргон. После установки образцов на подложку они саморазогревались и меняли свой цвет. Для выявления роли неоднородности плотности по длине образца на динамику разогрева использовали два варианта размещения образцов на подложке: 1) менее плотный торец (нижний торец при прессовании) находился вверх, 2) менее плотный торец находился вниз, т. е. на подложке.

Вариант 1. Независимо от диаметра образца (5 или 10 мм) его саморазогрев носит неоднородный характер, хотя и начинается одновременно по всей поверхности образца. Об этом свидетельствуют данные термодатчиков и инфракрасной видеосъемки тепловизором

FLIR E60 (см. рис. 5, а).

При визуальном анализе данных инфракрасной видеосъемки камерой FLIR E60 следует учитывать особенности обработки изображений: область с максимальной температурой в данный момент времени имеет одинаковую яркость на всех кадрах. Значение температуры в фиксированной точке образца показано в левом верхнем углу кадра (большой крест). Малым крестом на кадрах отмечено местоположение области с максимальной температурой. Значения максимальной температуры также приведены на рис. 5 (см. позицию «Макс»).

Причиной неоднородности разогрева образца являются как лучшие условия подвода окислителя у верхнего торца (нижний торец находится на газонепроницаемой подложке), так и потери тепла в массивную подложку. Другой причиной неоднородности разогрева является неравномерность плотности образца по высоте. Данные инфракрасной видеосъемки показали, что практически на всех этапах взаимодействия компактного образца с воздухом максимальная температура наблюдается вблизи верхнего (менее плотного) торца образца (см. рис. 5, а).

Вариант 2. В этом случае динамика саморазогрева образцов диаметром 5 и 10 мм была различной. Для образцов диаметром 5 мм (см. рис. 5, б) на начальном этапе процесса область максимального разогрева находится вблизи нижнего торца образца. Затем маркер максимальной температуры смещается вверх, однако не поднимается выше центра образца. Следовательно, даже тогда, когда более пористый торец закрыт для подвода окислителя и присутствуют теплопотери в подложку, менее плотная часть образца является более горячей на всем протяжении саморазогрева. Результаты оптической киносъемки процесса саморазогрева на воздухе образца, спрессованного из пирофорного нанопорошка железа, показали, что движение «волны изменения цвета» поверхности образца, совпадающее с движением «волны разогрева», в образцах диаметром 5 мм всегда направлено от горячего торца к холодному (как сверху вниз, так и снизу вверх).

Для образцов диаметром 10 мм наблюдалась другая динамика разогрева, она является следствием более однородного распределения плотности и пористости по длине образца (см. рис. 4). Действительно, для этих образцов выполняются условия однородности пори-

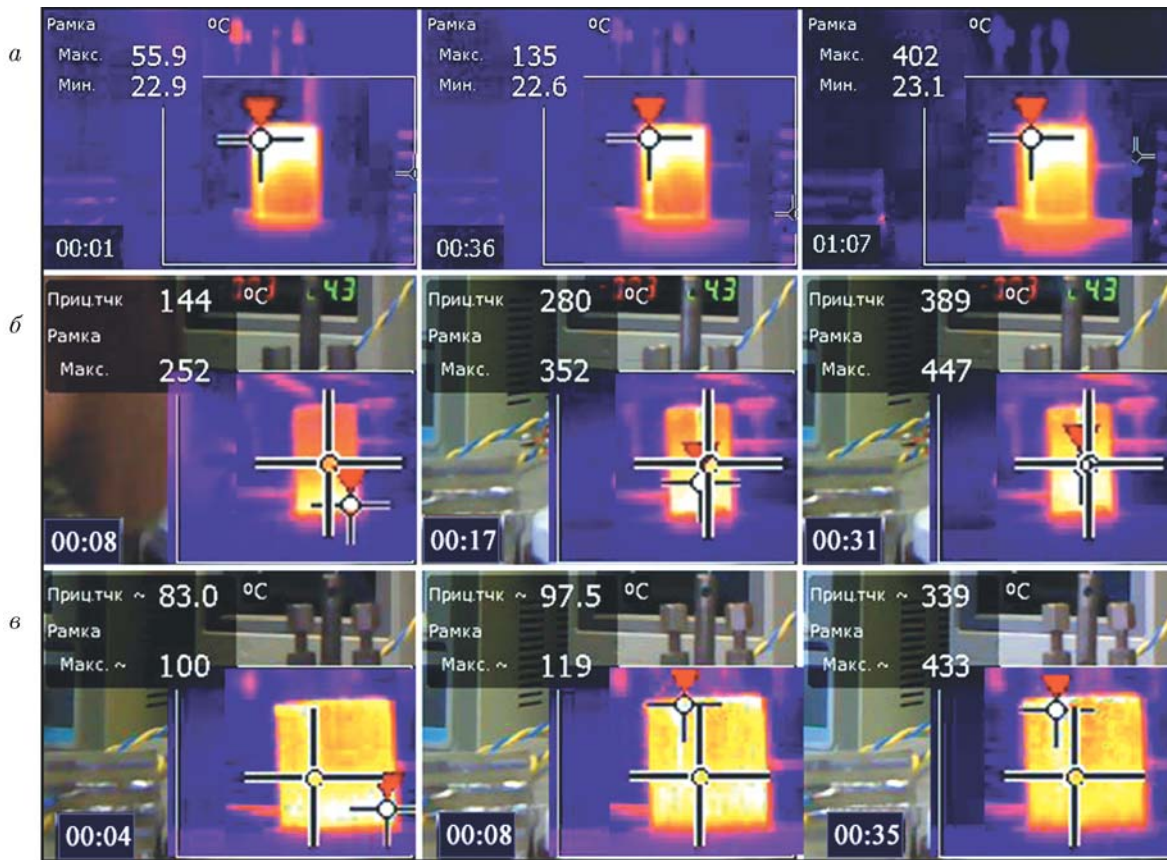


Рис. 5. Последовательность кадров тепловизионной (ИК) съемки образцов диаметром 5 мм (а, б) и 10 мм (в) при различном положении менее плотного торца:

а — вид сверху; б, в — вид снизу

стости по их длине [21], так как в наших экспериментах отношение длины образца к его диаметру было близко к 1. Максимальная температура на нижнем торце образца фиксировалась еще на этапе установки его на подложку. Через несколько секунд после того, как образец поставили менее плотным торцом вниз (нижний торец при прессовании), курсор тепловизора, фиксирующий место нахождения области с максимальной температурой, переместился на верхний торец и оставался там вплоть до охлаждения образца (см. рис. 5, в). Результаты оптической кино съемки саморазогрева образца на воздухе показали, что, в отличие от образцов диаметром 5 мм, в данном случае имеет место практически равномерное изменение цвета по всей поверхности.

### Вторая серия экспериментов

После проведения первой серии экспериментов была прекращена подача аргона в ем-

кость с бюксами. Через 20 мин после прекращения эксперименты продолжили по описанной ранее методике. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что такого времени достаточно для того, чтобы образцы диаметром 5 мм не разогревались после их извлечения из бюкса на воздух. Эксперименты показали, что режимы взаимодействия образцов с воздухом после извлечения из бюксов зависели как от длительности  $t$  нахождения бюксов на воздухе, так и от диаметра образцов. Последовательность проведения экспериментов с образцами разных диаметров была следующей: первыми доставали образцы диаметром 5 мм, затем 7 мм, в последнюю очередь — 10 мм. Интервал времени между отдельными экспериментами составлял  $5 \div 10$  мин. Эксперименты показали, что образцы диаметром 5 мм не разогревались совсем. Образцы диаметром 7 мм вели себя следующим образом: первый воспламенился с задержкой (частично пассивированный образец), второй, который достали через

5 мин после первого, не разогрелся. Образец диаметром 10 мм, который доставали последним ( $\approx 60$  мин после прекращения подачи аргона в емкость с бюксами), воспламенился с небольшой задержкой.

Проведенные эксперименты показали, что если температура саморазогрева превышала  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то образцы воспламенялись. Поэтому данное значение принимали за температуру воспламенения.

Примем в качестве задержки самовоспламенения время саморазогрева образцов до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  с момента установки образца на подложку. Тогда влияние на процесс воспламенения времени нахождения бюксов с образцами в воздухе можно оценить по разнице времен разогрева до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  частично пассивированных и непассивированных образцов. Непассивированные — это те образцы, которые использовались в первой серии экспериментов. На рис. 6 показано изменение во времени максимальной температуры разогрева частично пассивированных и непассивированных образцов диаметром 7 мм. Как видно из рисунка, процесс разогрева носит сходный характер и отличается только длительностью стадии задержки самовоспламенения. Определенная по данным рис. 6 разница времен задержки самовоспламенения составляет 50 с. Аналогично установлено, что для образцов диаметром 10 мм разница задержек составляет 14 с.

Для проверки гипотезы о том, что при нахождении закрытых бюксов на воздухе произошла именно пассивация с сохранением химической активности, а не полное окисление об-

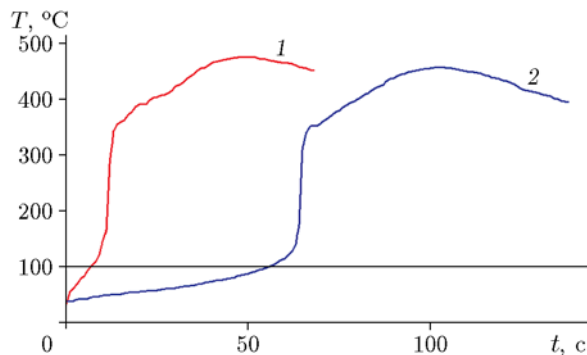


Рис. 6. Динамика разогрева образцов диаметром 7 мм без пассивации (1) и частично пассивированного (2)

разцов, были проведены следующие эксперименты. Образцы, которые после извлечения из бюкса не разогревались, поджигали вольфрамовой спиралью (рис. 7). Этот локальный разогрев приводил к распространению по образцу волны горения. Так как в процессе окисления поверхность образца меняла свой цвет, то зависимость скорости горения от времени можно было определить с помощью кадровой обработки данных видеосъемки. Оценка линейной скорости горения для образца, который приведен на рис. 7, дала значение  $\approx 0.025\text{ см/с}$ . Аналогичные результаты получены в [8] на засыпках из пассивированных (непирофорных) нанопорошков железа. Оказалось, что локальный разогрев спиралью приводил к распространению по поверхности засыпки волны горения. Качественное совпадение наших результатов с данными работы [11] является дополнитель-

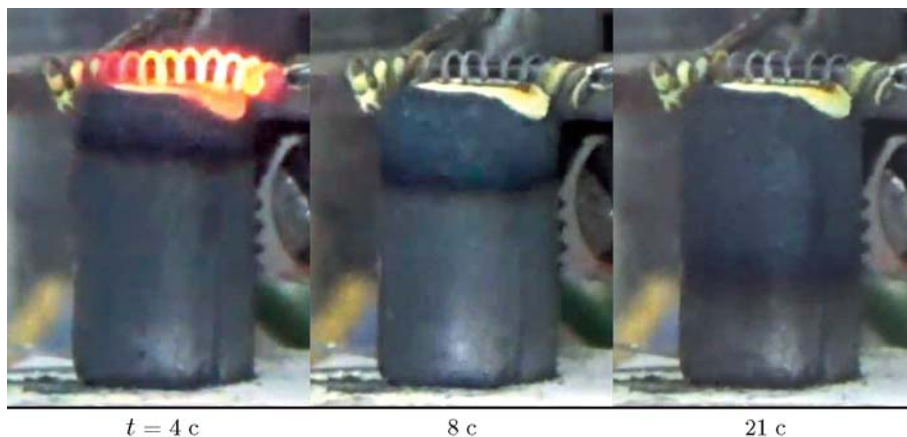


Рис. 7. Кадры видеосъемки процесса горения пассивированного (непирофорного) образца диаметром 5 мм

ным доказательством того, что в процессе нахождения бюксов на воздухе произошла именно пассивация образца.

Также был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) образцов диаметром 5 мм после саморазогрева на воздухе (непассивированные образцы) и пассивации, причем центральная и поверхностные области в каждом образце анализировались отдельно (рис. 8). Изображения поперечного сечения образцов на рис. 8 позволяют понять, как проводилось деление образца на центральную и поверхностную области. Цифры на рисунках поперечного среза соответствуют номеру рентгенограммы. Как видно из рис. 9, для образцов после саморазогрева содержание фазы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в центральной части об-

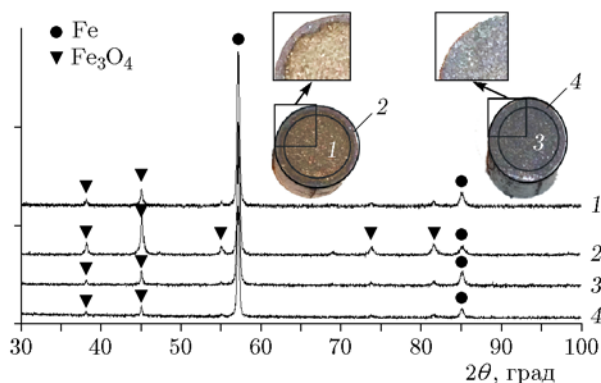


Рис. 8. Результаты РФА образцов диаметром 5 мм после саморазогрева и «пассивации»:

1 — центральная часть образца после саморазогрева, 2 — поверхностный слой образца после саморазогрева, 3 — центральная часть пассивированного образца, 4 — поверхностный слой пассивированного образца

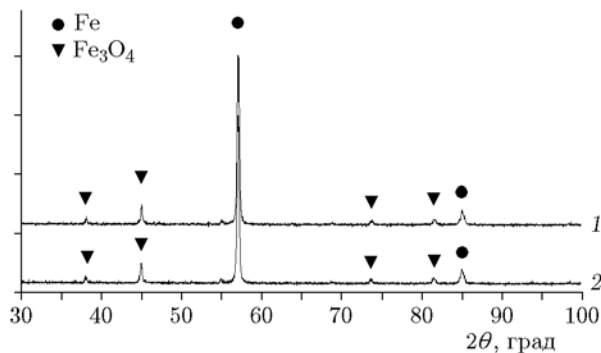


Рис. 9. Результаты РФА пассивированных образцов:

1 — образец до помещения в печь, 2 — образец, выдержанный 60 мин в печи при  $110^\circ\text{C}$  в воздушной среде

разца (кривая 1 на рис. 8) существенно меньше, чем в поверхностной области (кривая 2 на рис. 8). Эти результаты свидетельствуют о поверхностном характере взаимодействия образцов с воздухом при саморазогреве. Для пассивированных образцов содержания фазы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в центральной и поверхностной частях образца (кривые 3, 4 на рис. 8) практически совпадают, что позволяет говорить об объемном характере процесса пассивации.

Для проверки термической стабильности образцов диаметром 5 мм, пассивированных во второй серии экспериментов, их помещали в печь и выдерживали в течение 60 мин при температуре  $110^\circ\text{C}$  в воздушной среде. Проведенный после извлечения из печи рентгенофазовый анализ образцов показал, что никаких изменений в фазовом составе не происходит (см. рис. 9). Следовательно, пассивированные (непирофорные) компактные образцы из нанопорошка железа можно хранить на воздухе в широком интервале температур без дополнительного окисления.

Исследование методом СЭМ (микроскоп Ultra Plus фирмы Carl Zeiss, Германия) микроструктуры поперечного излома цилиндрического образца после самовоспламенения или горения показало, что она представляет собой скопление агломератов нанопорошка железа. Анализ микроструктуры излома отдельного агломерата в приповерхностной области образца (толщина  $300 \div 500$  мкм) обнаружил на поверхности агломератов беспористый слой («корку») толщиной около 300 нм. В центральной части образца на поверхности агломератов отсутствует плотная «корка», наблюдается лишь небольшое увеличение плотности на глубину примерно одной частицы (100 нм). Внутренняя структура агломератов как в приповерхностной области образца, так и в центральной части не имеет отличий и характеризуется практически одинаковым содержанием кислорода.

## ВЫВОДЫ

В работе исследованы закономерности саморазогрева компактных образцов диаметром 5, 7 и 10 мм из пирофорных нанопорошков железа.

Показано, что максимальная температура саморазогрева образцов из нанопорошков железа примерно одинаковой плотности

( $3.0 \div 3.6$  г/см<sup>3</sup>) практически не зависит от диаметра образцов и составляет  $450 \div 480$  °С.

Установлено, что участки образцов с более низкой плотностью на начальной стадии процесса разогреваются сильнее. Дальнейшее развитие процесса зависит от диаметра образцов.

Эксперименты показали, что для сохранения пирофорности образцов из нанопорошков железа емкости с притертой крышечкой должны находиться в среде инертного газа.

Показано, что при нахождении бьюсков с пирофорными образцами на воздухе происходит пассивация образцов. Время, необходимое для пассивации, возрастает с увеличением диаметра образцов.

Дополнительные эксперименты показали, что пассивированные компактные образцы сохраняют свою химическую активность, например, их можно воспламенить вольфрамовой спиралью.

Пассивированные образцы не окисляются при повышенных температурах — выдержка на воздухе в течение 1 ч при 110 °С не привела к возгоранию или изменению его фазового состава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bouillard J., Vignes A., Dufaud O., Perrin L., Thomas D. Ignition and explosion risks of nanopowders // France J. Hazard. Mater. — 2010. — V. 181, N 1–3. — P. 873–880. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.094.
2. Pivkina A., Ulyanova P., Frolov Y., Zavyalov S., Schoonman J. Nanomaterials for Heterogeneous Combustion // Propell., Explos., Pyrotech. — 2004. — V. 29, N 1. — P. 39. — DOI: 10.1002/prep.200400025.
3. Hosokawa M., Nogi K., Naito M., Yokoyama T. Nanoparticle Technology Handbook. — Elsevier, 2007.
4. Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Alymov M. I. Ignition and Wave Processes in Combustion of Solids. — Springer Int. Publ., 2017.
5. Flannery M., Desai T. G., Matsoukas T., Lotfizadeh S., Oehlschlaeger M. A. Passivation and stabilization of aluminum nanoparticles for energetic materials // Hindawi Publ. Corporation J. Nanomater. — 2008. — V. 2015. — P. 185–199.
6. Meziani M. J., Bunker C. E., Lu F., et al. Formation and properties of stabilized aluminum nanoparticles // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2009. — V. 13. — P. 703–709. — DOI: 10.1021/am800209m.
7. Nanoparticles: Synthesis, Stabilization, Passivation, and Functionalization / R. Nagarajan, T. Alan Hatton (Eds). — Washington DC: Am. Chem. Soc., 2008. — (ACS Symp. Ser.; V. 996).
8. Громов А. А., Строкова Ю. И., Дитц А. А. Пассивирующие покрытия на частицах электровзрывных нанопорошков алюминия (обзор) // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 2. — С. 77–91.
9. Kwon Y.-S., Gromov A. A., Stroková J. I. Passivation of the surface of aluminum nanopowders by protective coatings of the different chemical origin // Appl. Surf. Sci. — 2007. — V. 253. — P. 5558–5564. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.12.124.
10. Gromov A. A., Förster-Barth U., Teipel U. Aluminum nanopowders produced by electrical explosion of wires and passivated by non-inert coatings: Characterisation and reactivity with air and water // Powder Technol. — 2006. — V. 164. — P. 111–115. — DOI: 10.1016/j.powtec.2006.03.003.
11. Alymov M. I., Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Zelensky V. A., Ankudinov A. B. Temporal characteristics of ignition and combustion of iron nanopowders in the air // Mendeleev Commun. — 2016. — V. 26. — P. 452–454. — DOI: 10.1016/j.mencom.2016.09.030.
12. Alymov M. I., Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Zelensky V. A., Ankudinov A. B. Preparation and characterization of iron nanoparticles protected by an oxide film // Inorg. Mater. — 2017. — V. 53, N 9. — P. 911–915. — DOI: 10.1134/S0020168517090011.
13. Alymov M. I., Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Zelensky V. A., Ankudinov A. B. Passivation of iron nanoparticles at subzero temperatures // Mendeleev Commun. — 2017. — V. 27, N 5. — P. 482–484. — DOI: 10.1016/j.mencom.2017.09.017.
14. Alymov M. I., Rubtsov N. M., Seplyarskii B. S., Kochetkov R. A., Zelensky V. A., Ankudinov A. B. Combustion and passivation of nickel nanoparticles // Mendeleev Commun. — 2017. — V. 27, N 6. — P. 631–633. — DOI: 10.1016/j.mencom.2017.11.032.
15. Nazarenko O. B., Sechin A. I., Amelkovich Y. A. Characterization of naturally aged iron nanopowder produced by electrical explosion of wires // Metals and Mater. Int. — 2019. — DOI: 10.1007/s12540-019-00443-8.
16. Коршунов А. В. Кинетика окисления электровзрывного нанопорошка железа при нагревании в воздухе // Хим. физика. — 2012. — Т. 31, № 5. — С. 27–35.
17. Dong S., Cheng H., Yang H., Hou P., Zou G. Fabrication of intermetallic NiAl by self-propagating high-temperature synthesis reaction using aluminium nanopowder under high pressure // J. Phys.: Condens. Matter. — 2002. — V. 14. — P. 11023–11030. — DOI: 10.1088/0953-8984/14/44/421.



18. **Hunt E. M., Pantoya M. L.** Ignition dynamics and activation energies of metallic thermites: From nano- to micron-scale particulate composites // *J. Appl. Phys.* — 2005. — V. 98. — 034909. — DOI: 10.1063/1.1990265.
19. **Saceleanu F., Idir M., Chaumeix N., Wen J. Z.** Combustion characteristics of physically mixed 40 nm aluminum/copper oxide nanothermites using laser ignition // *Front. Chem.* — 2018. — N 6. — DOI: 10.3389/fchem.2018.00465.
20. **Gromov A. A., Teipel U.** *Metal Nanopowders: Production, Characterization, and Energetic Applications.* — John Wiley & Sons, 2014. — DOI: 10.1002/9783527680696.
21. **Кипарисов С. С., Либенсон Г. А.** *Порошковая металлургия: учеб. для техникумов.* — М.: Металлургия, 1991.

*Поступила в редакцию 20.05.2020.*

*После доработки 06.07.2020.*

*Принята к публикации 10.07.2020.*

---