

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

точно высоким значением коэффициента обеспеченности кислородом [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе с помощью комплексного исследования скорости горения и термического разложения проведен анализ влияния соотношения НА/ПХА на соответствующие характеристики ЭКС на смешанном окислителе. Показаны особенности горения таких ЭКС, обусловленные существованием концентрационных пределов по содержанию индивидуальных окислителей, существованием расплавленного слоя НА на поверхности горения образцов, растворением ПХА в расплаве нитрата аммония и связанного с этим катализом разложения ПХА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабук В.А., Глебов А.А., Долотказин И.Н. // Внутрикамерные процессы, горение и газо-

вая динамика дисперсных систем: Тр. IV Межд. школы–семинара. – СПб: БалтГТУ, 2004., С. 17–20.

2. Kuwahara T. // Journal of the Japan Explosives Society. –1999. – Vol.60. – N.2. – P. 66–69.

3. Muthiah Rm., Varghese T.L., Rao S.S. et all. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 1998. – Vol. 23. – P.90–93.

4. Beckstead M.W. A // Astronautics Laboratory, Edwards: Final Report AL–TR–89–016, 1986–1988., P.87.

5. Попок В.Н. // Ползуновский альманах. – 2007. – № 1–2. – С. 132–137.

6. Уэндланд Т. Термические методы анализа.- М.: Мир, 1978., С 407.

7. Попок В.Н. // Изв. вузов. Физика.– 2009.– № 7/2. – С. 167–173.

8. Попок В.Н., Якушева Е.С., Савельева Л.А. // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сб. докл. III Всерос. конф. молодых ученых. – Томск: ТГУ, 2007., С. 446–448.

9. Попок В.Н., Попок Н.И. // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2009. – № 1. – С. 10–16.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И НЕМЕТАЛЛОВ В СРЕДЕ ВОЗДУХА

В.Н. Попок¹, Н.В. Бояринова²

¹ ОАО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»

² Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН

В статье представлены результаты исследования термическими методами окисления порошков различной природы в среде воздуха. Определены тепловые эффекты при окислении порошков до температуры 550 °С, проведено сравнение порошков по тепловым эффектам окисления.

Ключевые слова: ультрадисперсные порошки, микродисперсные порошки, окисление, тепловые эффекты.

ВВЕДЕНИЕ

Микро- и ультрадисперсные (нано- и ультрадисперсные) порошки металлов и неметаллов вводятся в состав гетерогенных конденсированных систем (ГКС), используемых в качестве твердых топлив в двигателях ракетно-космических комплексов, газогенераторах, системах пожаротушения и других технических устройствах, в качестве металлического горючего, а также как катализаторы горения и термического разложения ГКС [1].

Основными требованиями, предъявляемыми к таким порошкам, являются высокие

значения удельной теплоты сгорания ($Q_{уд.}$), плотности, температуры горения, содержания основного вещества и отсутствие токсичных соединений в продуктах сгорания. В ряде работ [2–4] было показано сильное влияние порошков металлов и неметаллов различной дисперсности на скорость горения и термическое разложение ГКС на основе различных окислителей (перхлорат аммония, нитрат аммония и др.).

В последнее время, в связи с развитием нанотехнологий, были разработаны методики получения ультрадисперсных порошков (УДП) различных металлов и неметаллов.

Такие порошки отличаются от микропорошков своими характеристиками, прежде всего меньшей температурой начала интенсивного окисления ($T_{\text{нио}}$), более низким содержанием основного вещества, возросшей реакционной поверхностью, свойствами и структурой оксидных пленок [5]. В настоящее время УДП металлов и неметаллов широко исследуются в составе ГКС, однако введение больших количеств УДП в состав ГКС нежелательно, ввиду резкого роста вязкости ГКС, что приводит к технологическим проблемам при производстве и переработке таких систем в изделие. Применение УДП сдерживается малым содержанием основного вещества в таких порошках и их высокой стоимостью. Однако, использование УДП в составе ГКС выглядит перспективным ввиду большой их баллистической и энергетической эффективности - как следствие их высокой реакционной способности. Определение характеристик процессов окисления в различных средах позволяет более обоснованно проводить подбор УДП и их содержания в составе ГКС для реализации оптимальных характеристик энерговыделения.

Целью настоящей работы является исследование окисления различных по своей природе и дисперсности порошков металлов и неметаллов, наиболее часто используемых в качестве компонентов различных ГКС, в среде воздуха, сравнительный анализ параметров окисления и выделяющейся при этом теплоты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведено исследование окисления порошков различных веществ (таблица 1).

Таблица 1

Исследуемые порошки, их дисперсность и способ получения

Порошок	d, мкм	Способ получения
$\text{Cu}_{\text{эвм}}$	~0.1	1
$\text{Cu}_{\text{эо}}$	1-10	2
Zn	10-30	3
W	1-5	3
Fe	~0.1	1
Sn	~200	3
Ni	~0.1	1
Ti	~0.1	1
АСД-1	25-30	3
ALEX	~0.1	1
B	~0.02	6
C	~0,005	5
Si	~100	4

В таблице 1 представлены порошки, полученные следующими методами: 1 - электровзрыв проволок; 2 - электроосаждение; 3 - распыл расплава; 4 - размол; 5 - сжигание ацетилена; 6 - химическое восстановление.

Исследования проводились методами дифференциально-термического анализа (ДТА), совмещенного с термогравиметрическим (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием термоанализаторов TGA/SDTA 851^E и DSC 822^E фирмы «METTLER TOLEDO». Масса навески образцов 5 мг, скорость нагрева 10 град./мин. Доля окислившегося металла определялась из данных ТГА. В качестве характерной температуры выбрано ее значение равное 550 °C [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1 Параметры окисления порошков

Результаты определения термокинетических параметров окисления рассматриваемых порошков приведены на рисунках 1-10. Из представленных на рисунках 1, 2 данных видно, что УДП Cu , полученный электровзрывным методом (далее УДП $\text{Cu}_{\text{эвм}}$), характеризуется существенно более низкой температурой начала интенсивного окисления (далее $T_{\text{нио}}$), по сравнению с порошком Cu , полученного электроосаждением (далее $\text{Cu}_{\text{эо}}$).

Так, для УДП $\text{Cu}_{\text{эвм}}$ $T_{\text{нио}}=200$ °C, а для порошка $\text{Cu}_{\text{эо}}$ $T_{\text{нио}}=260$ °C. Из кривой ТГА (рисунок 2) видно, что процесс окисления УДП $\text{Cu}_{\text{эвм}}$ идет в две стадии: первая- $T=200-270$ °C, вторая- $270-390$ °C. Двухстадийность окисления $\text{Cu}_{\text{эвм}}$ также подтверждается пиками экзотермических эффектов на ДТА в данных температурных интервалах (рисунок 1). Окисление порошка $\text{Cu}_{\text{эо}}$ идет с меньшей скоростью и носит одностадийный характер (кривая ТГА), однако необходимо отметить наличие на кривой ДТА экзотермического пика в окрестности температуры $T=550$ °C (рисунок 1). Пик интенсивного окисления $\text{Cu}_{\text{эо}}$ смещен в более высокотемпературную область и характеризуется большей шириной по сравнению с пиком первой стадии окисления УДП $\text{Cu}_{\text{эвм}}$. Установлено, что при нагреве до $T=550$ °C масса окислившегося металла (MM_{550}) составляет около 83.5 % от массы металла, независимо от способа получения порошка Cu .

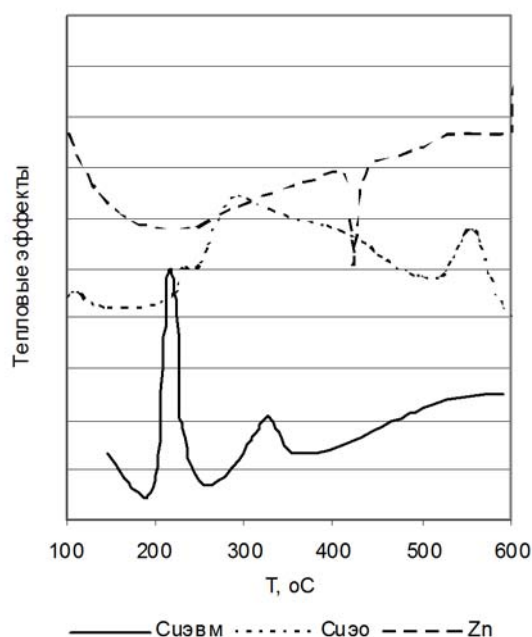


Рисунок 1. Кривые ДТА окисления порошков Cu_{30} , Cu_{300} , Zn

Однако, из данных ТГА (рисунок 2) видно, что при дальнейшем нагревании УДП Cu_{30} кривая набора массы выходит на плато, что свидетельствует об отсутствии окисления порошка в данном температурном интервале.

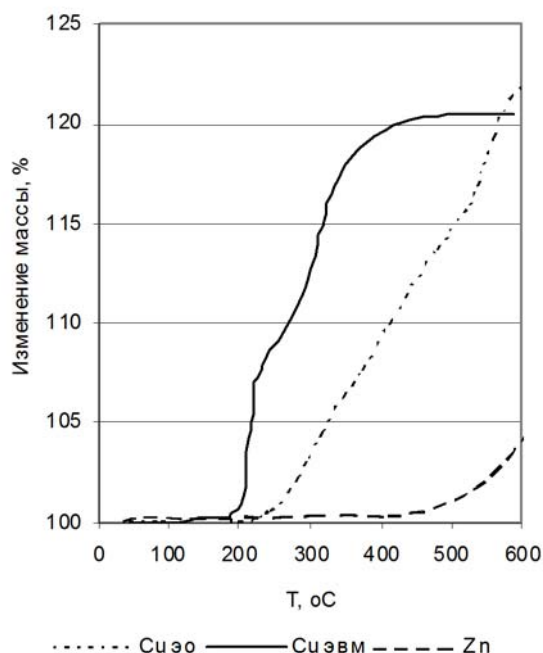


Рисунок 2. Кривые ТГА окисления порошков Cu_{30} , Cu_{300} , Zn

Для порошка Cu_{30} , напротив, при дальнейшем нагревании наблюдается интенсивное окисление (по данным ТГА) в температурном интервале $T=550-600^\circ\text{C}$, чем объясняется наличие второго экзотермического пика на кривой ДТА окисления порошка Cu_{30} (рисунок 1). Такое различие в параметрах окисления объясняется прежде всего большей реакционной поверхностью УДП Cu_{30} , по сравнению с более крупным порошком Cu_{300} , а также различиями в структуре и свойствах оксидных пленок рассматриваемых порошков.

Необходимо отметить, что рассмотренные температурные интервалы существенно ниже температур плавления как Cu , так и CuO . В данном случае окисление металла лимитируется диффузией окислителя через оксидную пленку.

Порошок Zn характеризуется высокой $T_{\text{нио}}$ ($T>550^\circ\text{C}$), это подтверждается данными ТГА и ДТА (экзотермический пик в окрестности температуры 600°C), рисунки 1, 2. На кривой ДТА (рисунок 1) в окрестности температуры $T=420^\circ\text{C}$ наблюдается эндотермический пик, который соответствует плавлению Zn [6]. Рассматриваемая температурная область значительно ниже температуры плавления ZnO , что позволяет судить о механизме окисления УДП Zn :

- при $T<T_{\text{пл}}$ Zn окисление порошка Zn идет с малой скоростью (рисунок 2), в данном случае окисление лимитируется диффузией окислителя через оксидную пленку частиц УДП Zn (которая, по-видимому, плохо проницаема для окислителя).

- при достижении $T=T_{\text{пл}}$ Zn происходит плавление металла внутри частиц порошка и объемное расширение расплава, что, в свою очередь, приводит к растрескиванию оксидной пленки и непосредственному контакту расплава Zn с окислителем. При этом резко возрастает скорость окисления, о чем свидетельствует рост массы на кривой ТГА (рисунок 2). Низкая проницаемость оксидной пленки на частицах порошка Zn также подтверждается малой долей металла (8.2 мас. % металла), окислившегося при нагреве порошка до $T=550^\circ\text{C}$.

Интенсивное окисление порошка W наблюдается в температурном интервале $T=400-500^\circ\text{C}$, что подтверждается данными ТГА и экзотермическим пиком (по данным ДТА) при данных температурах (рисунки 3, 4). Окисление с малой скоростью порошка W наблюдается уже при $T=300^\circ\text{C}$, сопровождающееся приростом массы образца (рису-

нок 4), а также ростом тепловыделения (рисунок 3).

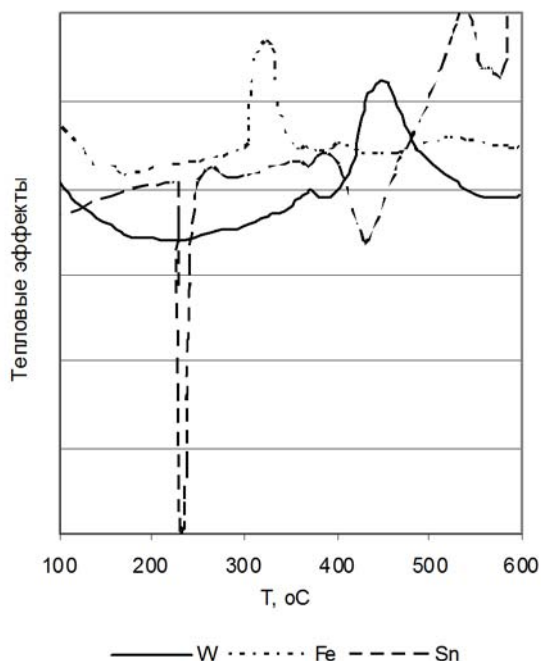


Рисунок 3. Кривые ДТА окисления порошков W, Fe, Sn

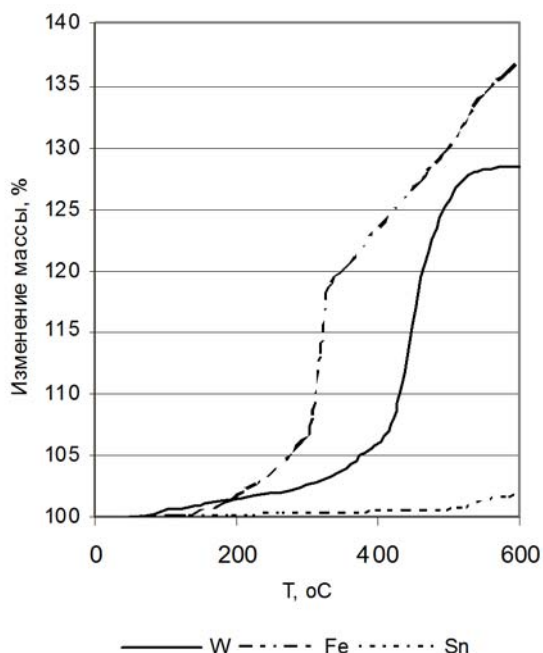


Рисунок 4. Кривые ТГА окисления порошков W, Fe, Sn

Необходимо отметить, что рассматриваемые температурные интервалы лежат существенно ниже $T_{пл}$ как W, так и его оксида, находящегося на поверхности частиц, что свидетельствует о диффузионном механизме окисления порошка W. По данным ТГА при нагреве порошка W до $T=550$ °C окисляется 100 мас. % металла.

При окислении УДП Fe можно выделить три температурные стадии:

1. При $T=200-300$ °C по данным ТГА (рисунок 4) наблюдается незначительный рост массы (5-7 мас. %), при этом на кривой ДТА (рисунок 3) в данном температурном интервале не отмечено существенных пиков тепловыделения, что также свидетельствует о низкой скорости окисления порошка на данной стадии.

2. При $T=300-350$ °C идет интенсивное окисление порошка (по данным ТГА увеличение массы около 12 %, рисунок 4). На кривой ДТА данному температурному интервалу соответствует мощный экзотермический пик (рисунок 3), что также свидетельствует об интенсивном окислении УДП Fe на данной стадии.

3. При $T=350-600$ °C скорость окисления по данным ТГА замедляется и соответствует скорости окисления УДП Fe на первой стадии ($T=200-300$ °C). Окисление сопровождается незначительными экзотермическими эффектами.

Рассмотренные температурные интервалы существенно ниже $T_{пл}$ как Fe, так и его оксида, что позволяет сделать вывод о диффузионном механизме окисления. По данным ТГА при нагреве УДП Fe до $T=550$ °C окисляется 81.7 мас. % металла.

При нагреве порошка Sn при температуре $T=230$ °C на кривой ДТА (рисунок 3) наблюдается эндотермический пик, который соответствует температуре плавления Sn [6]. По-видимому, после плавления Sn не происходит нарушения целостности оксидной пленки и отсутствует непосредственный контакт металла и окислителя и, как следствие, не наблюдается изменений в характере процесса окисления, о чем свидетельствует отсутствие изменения массы по данным ТГА (рисунок 4). Окисление порошка Sn вплоть до $T=600$ °C идет с очень малой скоростью. Также необходимо отметить, что при $T=550$ °C происходит доокисление SnO , входящего в состав оксидной пленки частиц, до SnO_2 [6], о чем свидетельствует эндотермический пик при $T=550-560$ °C. В данном случае, по-видимому, реализуется следующий механизм окисления: расплавленный металл находится

в твердой окисной оболочке ($T_{пл} \text{ SnO}_2$ около 2000°C), при этом с ростом температуры не происходит нарушения целостности окисной оболочки и окисление лимитируется диффузией окислителя через оксидную пленку.

При нагреве порошка Sn до $T=550^\circ\text{C}$ доля окислившегося металла составляет 14.8 мас. %.

Окисление УДП Ni можно разбить на три температурные стадии:

- при $T < 350^\circ\text{C}$ окисление идет с малой скоростью и не сопровождается выраженными тепловыми эффектами и изменением массы образца (рисунки 5, 6);

- при температуре $350-450^\circ\text{C}$ на кривой ТГА наблюдается интенсивный рост массы, а на кривой ДТА экзотермические эффекты, что свидетельствует об интенсивном окислении УДП Ni в данном температурном интервале;

- при переходе в область температур $T > 450^\circ\text{C}$ по данным ТГА и ДТА скорость окисления снижается.

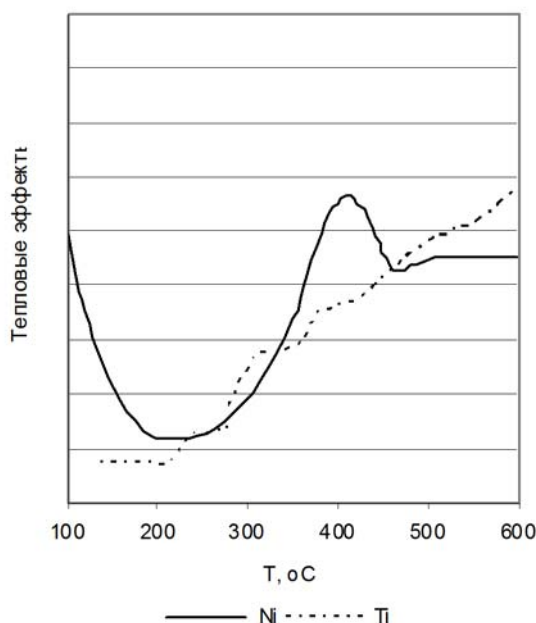


Рисунок 5. Кривые ДТА окисления порошков Ni и Ti

Так как рассматриваемые температурные интервалы существенно ниже температур плавления как Ni, так и его оксида, то в данном случае можно говорить о диффузионном механизме окисления УДП Ni. По данным ТГА при нагреве УДП Ni до $T=550^\circ\text{C}$ окисляется 46.5 мас. % металла.

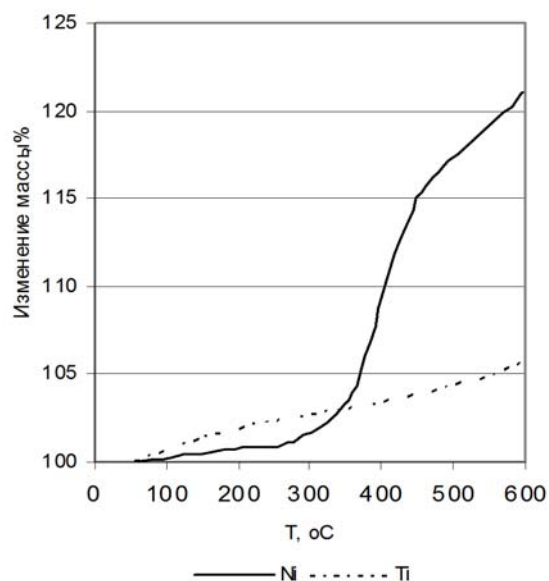


Рисунок 6. Кривые ТГА окисления порошков Ni и Ti

УДП Ti характеризуется низкой скоростью окисления во всем рассматриваемом интервале температур. Об этом свидетельствует малое изменение массы (по данным ТГА, рисунок 6) и отсутствие ярко выраженных тепловых эффектов на кривой ДТА (рисунок 5) - при нагреве УДП Ti до температуры $T=550^\circ\text{C}$ окисляется только 7.5 мас. % металла. Необходимо отметить, что рассматриваемые температурные интервалы ниже температуры фазовых переходов как Ti так и его оксида, что говорит о диффузионном механизме окисления УДП Ti.

По данным ТГА и ДТА окисление порошков алюминия марок «АСД-1» и «ALEX» до температуры $T=550^\circ\text{C}$ идет с малой скоростью (рисунки 7, 8), масса окислившегося металла при $T=550^\circ\text{C}$ составляет около 3.4 мас. % как для «АСД-1», так и «ALEX».

При дальнейшем нагревании до $T=600^\circ\text{C}$ для порошка марки «АСД-1» не наблюдается изменений в характере окисления. Для алюминия марки «ALEX», наоборот, по данным ТГА и ДТА при $T=550-600^\circ\text{C}$ наблюдается интенсивное окисление и при $T=600^\circ\text{C}$ доля окисленного металла составляет 39.4 мас. %.

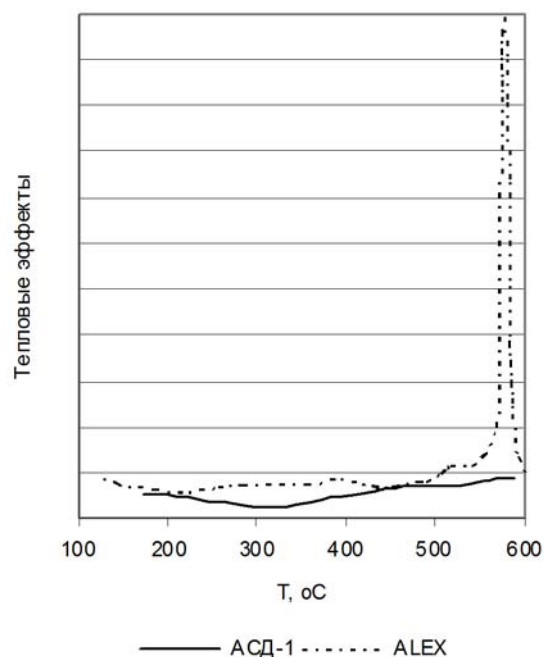


Рисунок 7. Кривые ДТА окисления порошков АСД-1 и ALEX

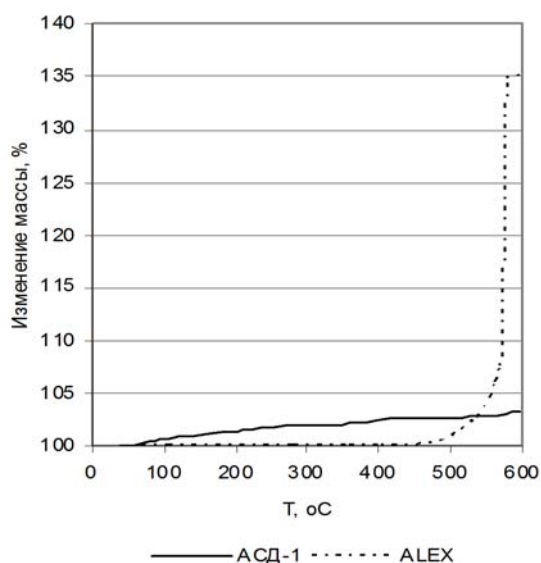


Рисунок 8. Кривые ТГА окисления порошков АСД-1 и ALEX

Такой различный механизм окисления порошков алюминия объясняется различиями в свойствах и структуре оксидных пленок, обусловленными различными условиями при получении данных марок порошков алюминия [3-5].

Окисление УДП В характеризуется тем, что до $T=350^\circ\text{C}$ оно идет с незначительной

скоростью, о чем свидетельствует слабый прирост массы на кривой ТГА и отсутствие ярко выраженных тепловых эффектов на кривой ДТА (рисунки 9, 10).

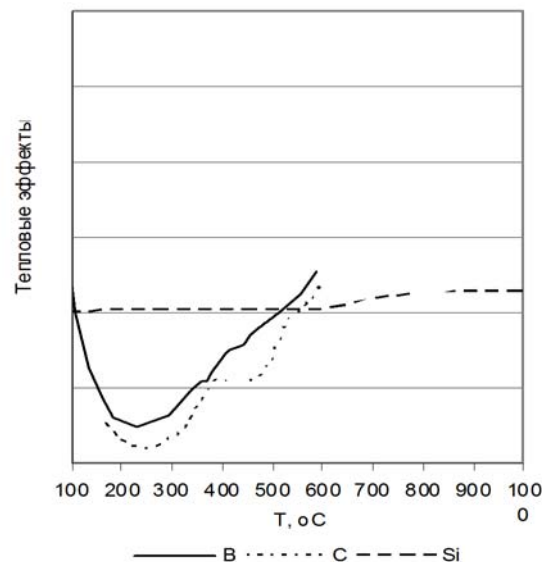


Рисунок 9. Кривые ДТА окисления порошков В, С, Si

Слабые тепловые эффекты, наблюдающиеся в температурном интервале $T=290-350^\circ\text{C}$, связаны с плавлением оксидной пленки и как следствие ускорением процесса окисления. При $T=350-450^\circ\text{C}$ наблюдается увеличение скорости роста массы и рост тепловыделения, что свидетельствует об интенсификации процесса окисления. Интенсивное окисление УДП В начинается при достижении температуры $T=450^\circ\text{C}$. Это связано, по-видимому, с плавлением всех модификаций оксида бора входящих в состав оксидной пленки [6]. При температуре $T=550^\circ\text{C}$ доля окислившегося бора составляет 6.3 мас. %. В случае окисления УДП В сложно судить о механизме окисления, т.к. не ясно, в каком фазовом состоянии находится оксидная пленка в температурном интервале $T=290-450^\circ\text{C}$, и, как следствие, не ясно, лимитируется ли окисление диффузией окислителя через оксидную пленку или осуществляется прямое взаимодействие окислителя и бора. При температурах $T < 290^\circ\text{C}$ окисление УДП В осуществляется в диффузионном режиме.

Интенсивное окисление УДП С начинается при $T>470^\circ\text{C}$ (рисунок 10). Однако, по данным ДТА (рисунок 9) в температурном интервале $T=350-400^\circ\text{C}$ наблюдается рост тепловыделения, который не связан с окислением УДП С, а, по-видимому, является следствием наличия примесей. Из данных

ТГА было установлено, что при достижении $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ окисляется 1.5 мас. % С.

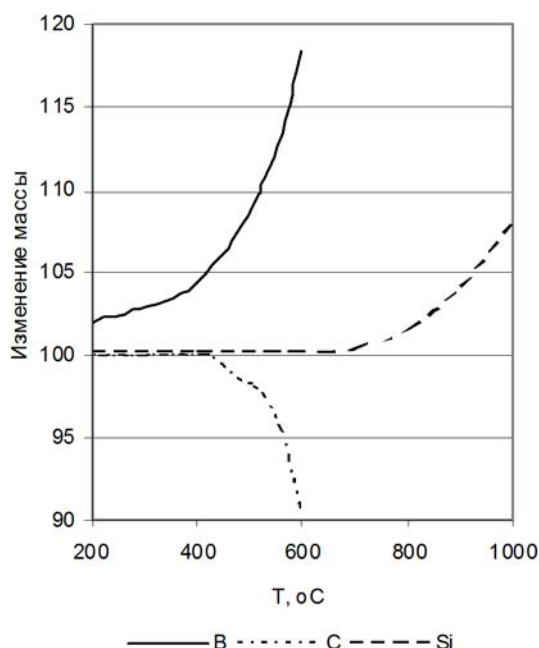


Рисунок 10. Кривые ТГА окисления порошков В, С, Si

Из данных представленных на рисунках 9, 10 процесс окисления порошка Si начинается при температуре $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$, при достижении температуры $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ доля окисленного Si составляет около 1 % от массы образца Si. Необходимо отметить, что такая слабая динамика окисления порошка Si наблюдается во всем температурном интервале эксперимента (до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2

Энергетические параметры окисления порошков

Порошок	$Q_{уд.}$, ккал/г	MM_{550} , масс. %	Q , ккал/г
$Cu_{эвм}$	1.7	83.5	1.42
$Cu_{эо}$	1.7	83.5	1.42
Zn	1.9	8.2	0.16
W	2	100	2
Fe	2.1	81.7	1.72
Sn	2	14.8	0.30
Ni	1.8	46.5	0.84
Ti	5	7.5	0.38
АСД-1	7.8	3.4	0.27
ALEX	7.8	3.4 (39.4)	0.27 (3.07)
B	16	6.3	1.01
C	8	1.5	0.12
Si	7.7	1	0.08

2 Тепловые эффекты

По полученным данным был проведен расчет удельной энергии (Q), выделившейся при окислении рассмотренных порошков. Удельная теплота сгорания по данным работ [1], рассчитанные доли окислившегося металла при нагревании до температуры $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MM_{550}) и удельная энергия, выделившаяся при окислении этих долей до $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 2. Для УДП алюминия марки «ALEX» в скобках приведены значения доли окислившегося металла и соответствующего теплового эффекта при нагреве порошка до температуры $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунках 11, 12 приведены данные по удельной теплоте сгорания металлов (неметаллов) при полном окислении порошков и данные, полученные при расчете количества тепла, выделившегося при нагревании рассматриваемых порошков до температуры $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ на воздухе.

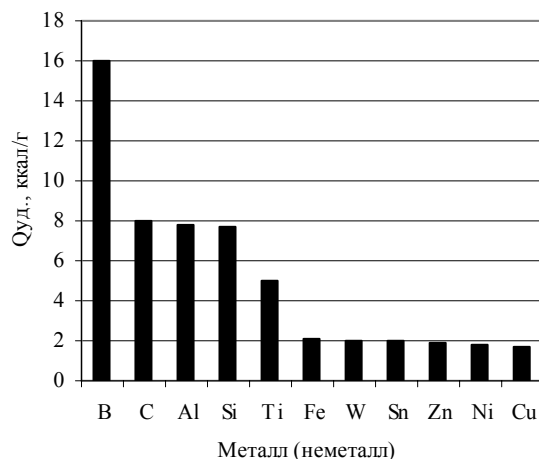


Рисунок 11. Удельные теплоты сгорания порошков (по данным работы [1])

Из представленных на рисунках 11, 12 данных видно, что при окислении металлов (неметаллов) имеющие высокие удельные теплоты сгорания (B, C, Al, Si, Ti) до температуры $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ выделяется гораздо меньшее количество тепла, чем при окислении металлов, характеризующихся более низкими значениями удельных теплот сгорания (Fe, W, Ni, Cu).

Это объясняется спецификой окисления рассмотренных порошков металлов и неметаллов, обусловленной, прежде всего, свойствами и структурой оксидной пленки, которые в свою очередь определяются условиями получения и хранения порошков металлов (неметаллов).

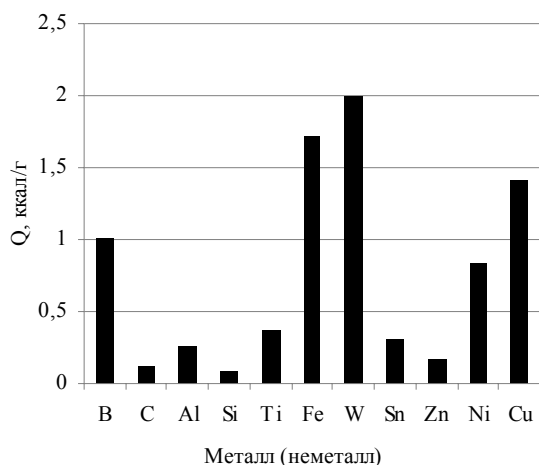


Рисунок 12. Количество тепла выделившееся при нагревании порошков до 550 °С

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из представленных экспериментальных и расчетных данных видно, что параметры окисления рассмотренных порошков определяются свойствами и структурой оксидных пленок, которые, в свою очередь, зависят от условий получения порошков. Эти особенности ярко проявляются при рассмотрении порошков Cu и Al, полученных различными способами.

Необходимо отметить, что электровзрывные порошки хотя и характеризуются более низким содержанием основного вещества [5], но их оксидные пленки находятся в иной модификации, в отличие от порошков, полученных другими методами (в равновесных условиях - распыл расплава, электроосаждение) и, как показано на примере алюминия марки «ALEX» [4, 7], являются катализаторами горения и термического разложения некоторых компонентов ГКС [4] в отличие от оксидных пленок на частицах порошков, полученных в равновесных условиях. Катализ термического разложения и горения ГКС оксидами, входящими в состав оксидных пленок, позволяет снизить требования по содержанию основного вещества в электровзрывных порошках, что существенно увеличивает

области их применения и снижает их стоимость.

В связи с этим необходимо дальнейшее исследование свойств форм оксидов, входящих в состав оксидных пленок. В частности, необходимо исследование влияния оксидов на параметры термического разложения и горения как ГКС, так и их компонентов.

Приведенные в таблице 2 и на рисунках 11, 12 данные показывают необходимость детального анализа энергетических вкладов процесса окисления порошков в общую картину горения и термического разложения ГКС. Для этого необходимо проводить исследования окисления порошков различными окислителями (перхлорат аммония, нитрат аммония и др.) с учетом взаимодействия оксидных пленок частиц порошков с рассматриваемыми окислительными средами [3, 7, 8], а также синергетических эффектов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука. – 1972. – С. 294.
2. Л.Т. Де Лука, Л. Галфетти, Ф. Северини и др. // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 80-94.
3. Коротких А.Г. // Четвертая международная школа-семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем»: сборник материалов: Изд-во БалтГТУ. – 2004., С. 48-52.
4. Попок В.Н. // III Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук»: Труды конференции: Издание Томского политехнического университета. – 2006., С. 56-57.
5. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. Томск: изд-во Том. ун-та. – 2002., С.154.
6. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник (изд. 2-е, испр. и доп.). Изд-во «Химия» (Ленинградское отделение). – 1978., С. 392.
7. Попок В.Н., Вдовина Н.П. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – № 12/2. – С. 99-101.
8. Горбунов В.В., Шидловский А.А. // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т.21, №5. – С.37-39.
9. Глазырин В.Е., Попок В.Н., Савельева Л.А. // Физика и химия высокоэнергетических систем: сборник материалов IV Всероссийской конференции молодых ученых (22-25 апреля 2008 г., г. Томск). – Томск: ТМЛ-Пресс. – 2008., С. 380-382.