

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ МАГНИЯ В ОКСИДАХ УГЛЕРОДА.

1. ГОРЕНИЕ В CO_2

У. И. Гольдшлегер, Е. Я. Шафирович

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка

Экспериментально исследовано окисление и горение одиночных частиц магния в среде CO_2 в диапазоне температур окружающей среды $898 \div 1323$ К. Обнаружен режим медленного гетерогенного горения, разделяющий области медленного окисления и быстрого парофазного горения. Обсуждается связь процесса воспламенения и горения летучего металла со структурой и свойствами поверхностной пленки.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время повышенный интерес к исследованиям воспламенения и горения магния в углекислом газе связан с идеей использования CO_2 из атмосферы Марса в качестве окислителя для воздушно-реактивных [1] и ракетных [2–4] двигателей.

В последние годы появился ряд работ по окислению, воспламенению и горению магния в CO_2 , в которых применялись различные экспериментальные методики. В [5–7] образцы размером $1 \div 2,5$ мм, установленные на спае термомпары, с помощью специального механизма вводили в электропечь внутри стального сосуда. В [8, 9] магниевые диски диаметром 10 мм нагревали излучением ксеноновой лампы в заторможенном потоке газа. В [10] исследовали воспламенение одиночных частиц размером $20 \div 600$ мкм, лежащих на внутренней поверхности микроэлектропечи. В [11] изучали диффузионное пламя, образуемое встречными потоками паров магния и окисляющего газа (CO_2).

Хотя в этих работах выявлен ряд особенностей воспламенения и горения магния в CO_2 , многие аспекты этого сложного процесса еще не ясны. Это связано и с общими проблемами понимания механизмов окисления летучих металлов при высокой температуре. При относительно высоком давлении паров металла в поверхностной пленке может идти и чисто гетерогенная реакция (реакция конденсированного металла с газообразным окислителем), и так называемая «парогазовая» реакция (реакция паров металла с окислителем). Это обстоятельство привело к появлению ряда альтернативных моделей высокотемпературного окисления и воспламенения летучих металлов. В «тепловых» моделях [12–14] считается, что воспламе-

нение частицы происходит благодаря тепловому самоускорению гетерогенной реакции, протекающей на границе раздела металл — пленка. При этом испарение металла либо вообще не учитывается [12, 13], либо сводится к дополнительным теплотерям [13, 14]. В «парофазных» моделях окисления [15–17], наоборот, реакция паров металла с окислителем играет решающую роль уже на ранних стадиях процесса. В этом случае тепловое самоускорение «парогазовой» реакции приводит к увеличению скорости испарения металла и, как следствие, к вытеснению реакции из пористой пленки на ее поверхность. В результате воспламенение происходит вблизи поверхности частицы в газовой фазе.

Для всех вышеперечисленных моделей характерно предположение о постоянстве механизма окисления и вида кинетического закона в ходе химического превращения. Такое предположение представляется нам недостаточно обоснованным. К настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных фактов, указывающих на возможность существования между медленным окислением и быстрым парофазным горением промежуточного режима со своим особым механизмом реагирования. Подобный режим, получивший название «режим горения с пенообразованием» [18], был обнаружен при окислении сферических образцов магния в бедных кислородозотных смесях (менее 10 % O_2). В работе [19] показано, что определяющим фактором в механизме воспламенения является эффект «памяти» поверхностной пленки: в экспериментах время задержки воспламенения образцов с предварительно выращенной окисной пленкой, охлажденных до комнатной температуры, после по-

вторного нагрева сокращалось на величину, равную времени выращивания пленки. По мнению авторов [18, 19], срыв теплового равновесия в системе всегда происходит при температуре выше температуры плавления магния и связан, в первую очередь, с кинетическим самоускорением парогазовой реакции вследствие увеличения во времени числа сквозных пор и трещин в окисной пленке. С указанными результатами хорошо согласуются и данные [20]. В этой работе методом электронной микроскопии закаленных образцов убедительно показано, что непосредственно перед образованием газофазного пламени в поверхностном слое, который имеет сложную трехмерную структуру, одновременно происходят движение жидкого магния, его испарение и парогазовая реакция.

Приведенные данные указывают, что разобраться в механизме воспламенения магния можно лишь на основе знания кинетических закономерностей окисления при высокой температуре и глубокого понимания физико-химических процессов, происходящих в поверхностной пленке.

Цель настоящей работы — установить связь макрокинетики высокотемпературного взаимодействия Mg и CO_2 с механизмами перехода реакции с поверхности раздела металл — пленка на внешнюю поверхность пленки и далее в газовую фазу. Для получения кинетической информации использовали модифицированную термогравиметрическую методику [21], для визуальных наблюдений за динамикой изменения поверхности образца — проточный реактор со смотровыми окнами. Весовые и температурные измерения дополнены микроскопическими исследованиями структуры закаленных образцов и поверхностных пленок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования являлись цилиндрические образцы магния диаметром $1 \div 3$ мм, равным высоте цилиндра. Образцы, как правило, имели осевое отверстие для крепления к подвесу — тонкой (диаметром $0,05 \div 0,1$ мм) проволоке или термопаре. В отдельных опытах использовали непросверленные образцы, которые устанавливались на прикрепленную к подвесу платформу из вольфрамовой сетки толщиной $\sim 0,05$ мм. Образцы перед окислением шлифовали, промывали в спирте и высушивали. Чистота магния 99,99 %, а содержа-

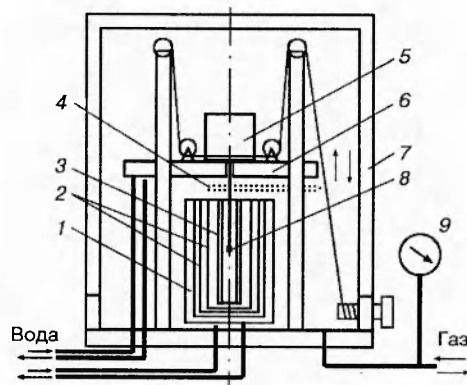


Рис. 1. Схема термогравиметрической установки:

1 — рубашка охлаждения, 2 — теплозащитные экраны, 3 — электропечь, 4 — поворотная диафрагма, 5 — электронные микровесы, 6 — подвижная платформа, 7 — стеклянный колпак, 8 — образец, 9 — вакуумметр

ние кислородсодержащих примесей в углекислом газе по данным масс-спектрометрического и хроматографического анализов составляло: $[\text{O}_2] < 0,08 \%$, $[\text{H}_2\text{O}] < 0,1 \%$, CO не обнаружен.

Схема термогравиметрической установки показана на рис. 1. Вертикальная электрическая печь (алундовая труба диаметром 30 и длиной 100 мм) с теплозащитными экранами и водяной рубашкой охлаждения и электронные микровесы на подвижной платформе размещены внутри 20-литрового стеклянного сосуда стандартного вакуумного поста ВУП-4. Образец подвешивается к коромыслу весов на вольфрамовой проволоке. В серии опытов по измерению температуры образца в качестве подвеса использовали вольфрамниевую термопару ВР 5/20 или хромель-алюмелевую. Поворотная диафрагма защищает образец от неконтролируемого окисления на стадии нагрева печи. После вакуумирования, создания требуемого состава газовой среды в сосуде и достижения заданной температуры в печи диафрагма поворачивается и образец опускается в изотермическую зону печи. В течение всего эксперимента проводятся измерения массы или температуры образца. Одновременно измеряется температура газа термопарой, расположенной на заданном расстоянии от поверхности частицы. В ходе опыта процесс окисления можно было легко прервать на различных стадиях для последующего физико-химического исследе-

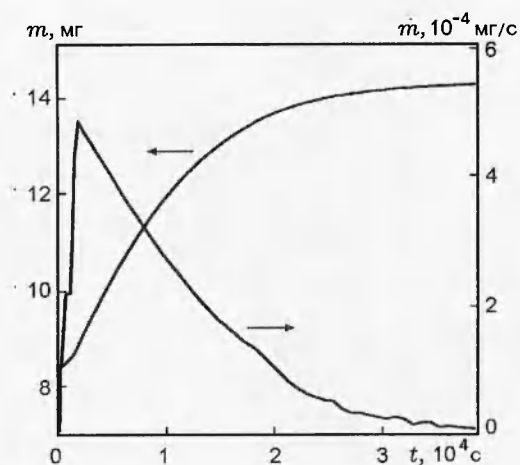


Рис. 2. Масса образца и скорость ее прироста в ходе реакции при $T_0 = 922$ К

дования закаленных образцов. Установка позволяет проводить исследования в строго контролируемых условиях, обеспечивая высокую стабильность параметров процесса в течение длительных (до нескольких часов) экспериментов. Чувствительность микровесов ≈ 1 мкг, постоянная времени ≈ 30 мс, дрейф нуля менее $0,5$ мкг/ч. Корректность использования термогравиметрического метода для исследования относительно медленного горения одиночных частиц или капель горючего показана в [21, 22].

Для визуальных наблюдений использовали установку, собранную на основе горизонтальной трубчатой печи СУОЛ-0,4,4/12-М2. В канале печи находится тонкостенная труба из нержавеющей стали диаметром 50 мм и длиной 1 м со смотровым окном в торце, через которую продувается рабочий газ. Вдоль оси трубы может свободно передвигаться двухканальная керамическая трубка с термопарой, на спае которой устанавливается образец. После достижения заданных значений температуры и скорости потока газа в трубе образец вводится в изотермическую высокотемпературную зону печи.

Эксперименты проводили в диапазоне температур газовой среды $T_0 = 898 \div 1323$ К при давлении 1 атм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Термогравиметрические исследования. При температуре окружающей среды ниже температуры плавления магния (923 К) наблюдалась очень медленная реакция окисления, протекающая без разогрева образца и газовой фа-

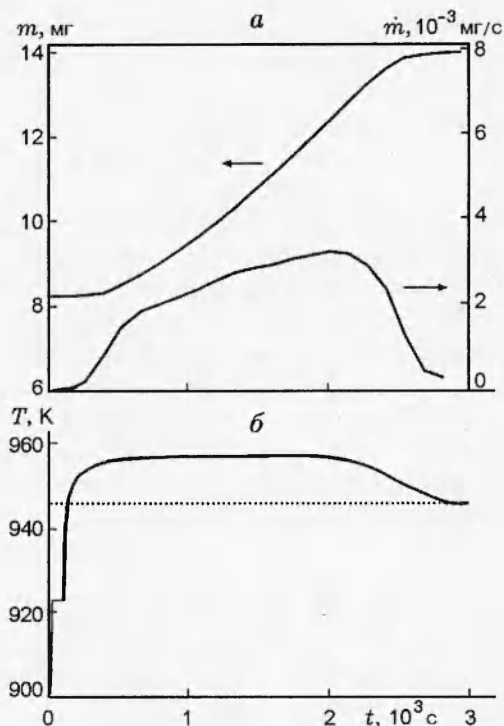


Рис. 3. Масса образца и скорость ее прироста (а), температура образца (б) в ходе реакции при $T_0 = 945$ К

зы (рис. 2). При $T_0 = 898 \div 923$ К закономерности превращения магния в CO_2 подобны его окислению в кислородсодержащей среде (параболический закон окисления) и на стадии незащитного окисления описываются зависимостью, близкой к классическому линейному закону для сферы [23, 24] — при $0,05 < \eta < 0,9$ скорость окисления $d\eta/dt \sim (1 - \eta)^{0,72}$. Здесь $\eta = (m - m_0)/(m_k - m_0)$ — глубина превращения; m , m_0 , m_k — текущая, исходная и конечная массы образца.

Реакция становится существенно более быстрой при температуре газа выше температуры плавления магния. При этом не только резко (почти на порядок) уменьшается время полного реагирования образца, но и изменяется характер превращения. В диапазоне $T_0 = 923 \div 965$ К мы наблюдали режим взаимодействия, который по формальным признакам можно определить как медленное (вырожденное) гетерогенное горение.

На рис. 3 приведены типичные кривые изменения массы, скорости ее прироста и температуры образца в этом режиме. Видно, что большую часть опыта реакция идет практически при постоянной температуре частицы,

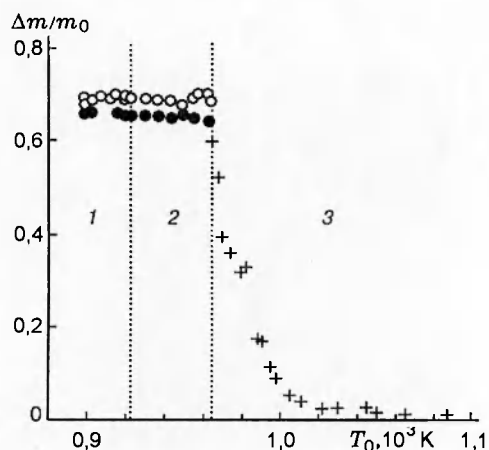


Рис. 4. Режимы превращения и относительный прирост массы образца в зависимости от температуры окружающей среды:

1 — окисление, 2 — медленное гетерогенное горение, 3 — парофазное горение; светлые точки — прирост массы за полное время гетерогенного превращения в среде CO_2 , темные — после дожигания на воздухе, крестики — за время гетерогенного превращения до парофазного воспламенения в среде CO_2

превышающей температуру окружающей среды на $10 \div 12$ К. Кривые изменения массы имеют S-образную форму, а закон окисления подобен автокаталитическому (см. рис. 3, а). Самоускорение реакции наиболее сильно выражено при малых глубинах превращения, а максимуму скорости окисления отвечает значение $\eta \approx 0,8$. Увеличение температуры среды приводит лишь к незначительному росту перегрева частицы и смещению максимума скорости реакции в сторону больших глубин превращения. В целом, диапазон величин перегрева составлял $10 \div 20$ К, а диапазон значений глубины превращения, отвечающих положению максимума скорости, — $\eta \approx 0,75 \div 0,84$. Как и в первом режиме, саморазогрев в газовой фазе здесь не зарегистрирован.

Следует отметить, что в обоих рассмотренных режимах масса образца увеличивалась за время полного окисления в CO_2 на $68 \div 70$ % (см. рис. 4). Качественный анализ показал наличие в образцах фаз MgO , Mg_2C_3 и свободного углерода. Как правило, образцы, полностью прореагировавшие в CO_2 , выводились из печи и после замены среды в сосуде воздухом вновь вводились в печь при той же температуре. Происходило догорание образца, сопровождавшееся его разогревом на $300 \div 350$ К

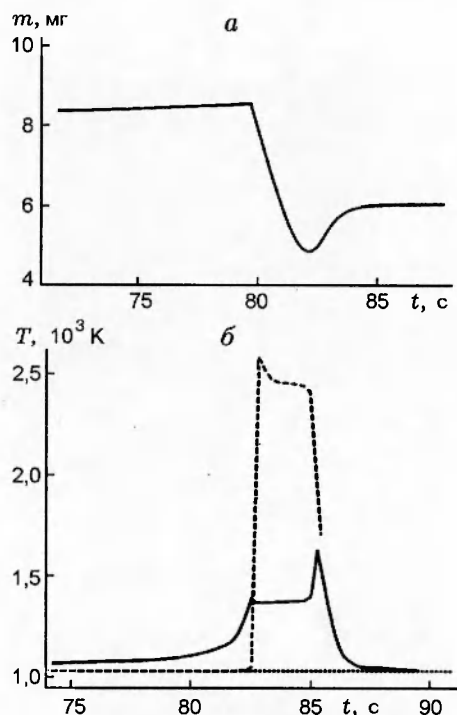


Рис. 5. Масса образца (а), температуры образца (б, сплошная линия) и пламени (б, штриховая линия) на стадии парофазного горения в CO_2 при $T_0 = 1023$ К

и уменьшением приращения массы до значений $\Delta m/m_0 \approx 0,66 \div 0,64$ (см. рис. 4). В догоревших образцах обнаружена только фаза MgO . Сопоставление этих экспериментальных значений с расчетным $\Delta m/m_0 = 0,658$, отвечающим полному окислению магния в кислороде, показало, что потери металла во внешнюю среду при его окислении в CO_2 не превышают 1 %.

В условиях нашего эксперимента верхней границе режима медленного гетерогенного горения отвечает температура газа $T_0 \approx 965$ К. При более высокой температуре после прогрева образца и его гетерогенного превращения всегда наблюдался переход в устойчивое парофазное горение. Характерные для этого режима кривые изменения массы, температуры частицы и пламени приведены на рис. 5. Данные термопарных измерений и визуальных наблюдений парофазного горения частицы хорошо согласуются с результатами [5–7]. Гравиметрические измерения позволили нам получить новую информацию о закономерностях перехода от гетерогенного превращения к парофазному горению. Оказалось, что вблизи нижней температурной границы области парофазного горе-

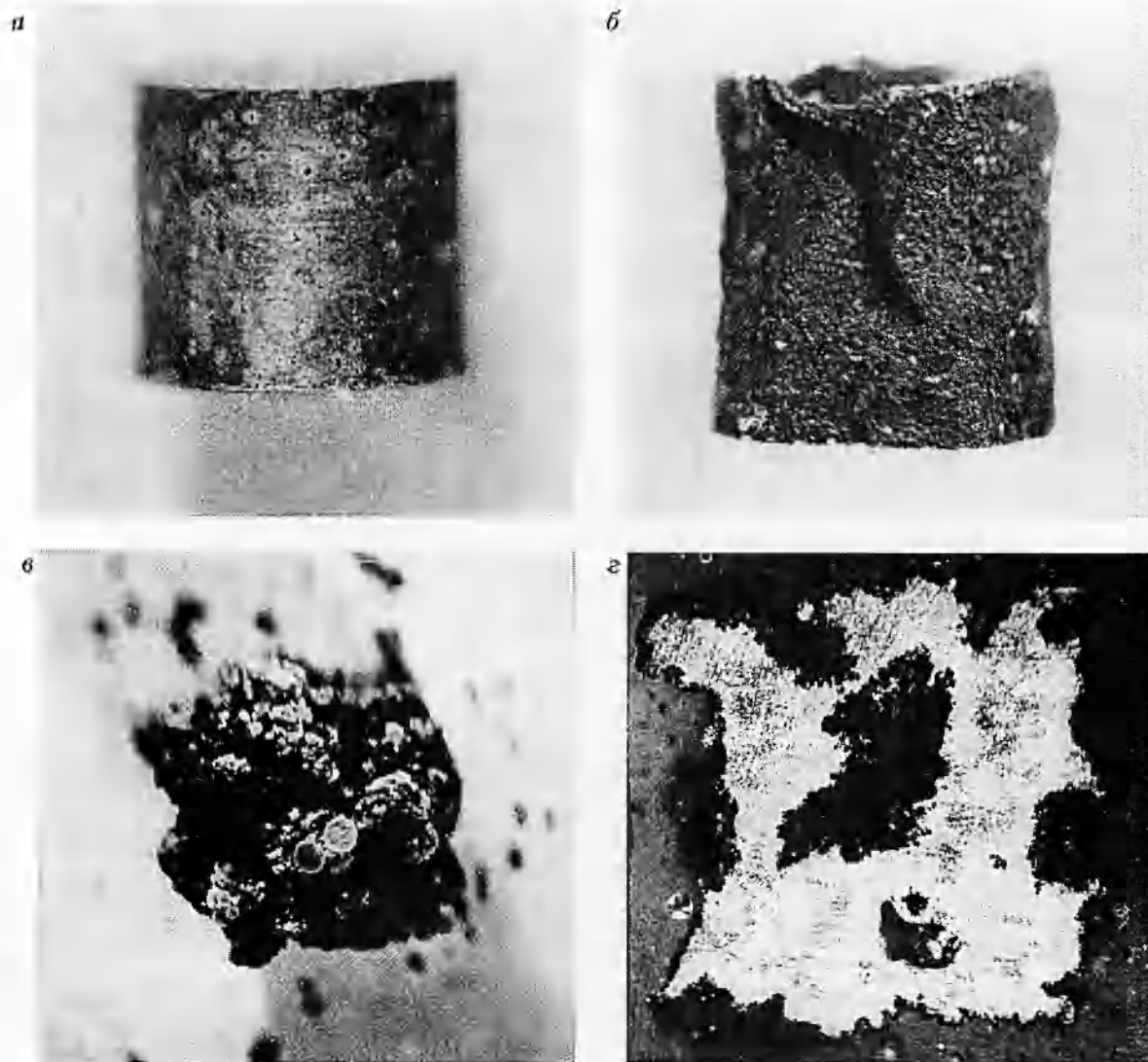


Рис. 6. Внешний вид (а-в) и шлиф (г) образца в различные моменты окисления

ния воспламенение в паровой фазе происходит лишь после того, как магний уже почти полностью прореагировал по гетерогенному механизму. Так, например, при $T_0 \sim 965$ К к моменту воспламенения $\Delta m/m_0 \sim 0,59$, что отвечает глубине превращения $\eta \approx 0,86$ (см. рис. 4). С ростом температуры газа доля металла, прореагировавшего гетерогенно, быстро падает, и парофазное воспламенение происходит при ничтожно малых глубинах превращения.

Структура и морфология образцов. Визуальные наблюдения во время опытов и микроскопические исследования закаленных образцов дают следующую картину развития процесса (рис. 6).

Сначала на поверхности образца появляются светлые пятна с черными точками в середине (см. рис. 6,а), количество которых с течением времени увеличивается. Одновременно происходит и радиальный рост пятен. Этот процесс напоминает типичную начальную стадию гетерогенного окисления металла с образованием центров адсорбции, изолированных областей пленки и их последующим слиянием [23, 24]. В режиме медленного окисления твердого магния пятна, соединяясь друг с другом, образуют довольно плотную темно-серую пленку. Однако в ходе дальнейшего превращения пленка быстро теряет свои защитные свойства и становится проницаемой — на шлифах

отчетливо видны сквозные трещины. Микроскопические исследования также показали, что увеличение массы образца сопровождается перемещением границы раздела металл — оксид вглубь металла.

Характер развития процесса принципиально изменяется в более высокотемпературных режимах. При достижении частицей температуры плавления магния в поверхностной пленке возникают макротрещины (см. рис. 6, б). Поверхность образца сильно деформируется (образец одновременно начинает приобретать форму капли), а вблизи макротрещин появляются тонкостенные сферические пузыри размером до 5 мкм (см. рис. 6, в). Именно в этот момент регистрируется увеличение массы образца и его саморазогрев.

Вблизи нижней температурной границы режима медленного гетерогенного горения размер образца в ходе процесса значительно (в 2–3 раза) возрастает. При этих температурах как растущий слой продуктов реакции, так и полностью прореагировавший образец представляют собой фактически очень рыхлый конгломерат темно-серых сферических пустотелых образований.

При удалении от нижней температурной границы рассматриваемого режима на 5 ÷ 10 К плотность поверхностной пленки заметно возрастает. Одновременно значительно уменьшается характерный размер зерен пленки. Из таких образцов, окисленных до различных глубин превращения, удалось изготовить шлифы и исследовать их структуру. Оказалось, что на стадии гетерогенного горения пористая пленка всегда пропитана магнием, внутри же образца имеется полость (см. рис. 6, г). Из-за увеличения размера полости в ходе процесса конденсированный остаток представляет собой пористую оболочку, внутренний размер которой сопоставим с размером исходного образца. Дальнейшее повышение температуры не приводит к качественным изменениям структуры; сохраняется лишь тенденция к увеличению плотности окисной пленки.

Описанная динамика развития процесса характерна и для области парофазного горения. Однако, в отличие от предыдущего режима, конденсированный остаток здесь имеет неоднородную структуру и, как и в [5, 7], состоит из относительно плотной оболочки, покрытой рыхлым высокопористым слоем окиси магния. Образование наружного слоя, как

показали термогравиметрические измерения и визуальные наблюдения, обусловлено конденсацией продуктов газофазной реакции на заключительной стадии парофазного горения (см. рис. 5, а).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось выше, при температуре газа ниже температуры плавления металла реакция магния с CO_2 полностью протекает внутри образца¹ и экспериментальные данные в рамках феноменологического подхода можно описать зависимостью, близкой к параболическому закону для сферы [23, 24].

Изменение агрегатного состояния металла приводит к принципиально иному механизму протекания процесса, который определяет закономерности превращения не только в режиме медленного гетерогенного горения, но, во многом, и в режиме парофазного горения магния.

Отсутствие разогрева в системе частица — газ при низкотемпературном окислении, малые, практически не зависящие от температуры потери металла на испарение и результаты структурных исследований закаленных образцов позволяют сделать вывод, что переход к режиму медленного гетерогенного горения обусловлен катастрофическим растрескиванием окисной пленки при достижении частицей температуры плавления магния. При этом причиной нарушения механической прочности пленки является увеличение удельного объема магния при его переходе в жидкое состояние [25]. Жидкий металл растекается по образовавшимся порам и оказывается в прямом контакте с окислителем. Реакция фактически переходит с внутренней на внешнюю границу окисной пленки, благодаря чему ее эф-

¹Закономерности превращения в этом режиме формально можно объяснить и с позиций классической теории реакционной диффузии [23, 24]. Однако ряд косвенных данных указывает на возможность протекания процесса по парофазному механизму [15–17]. Специально поставленные эксперименты показали, что скорость испарения в инертную среду частиц, предварительно окисленных в CO_2 до определенной глубины превращения, сопоставима со скоростью прироста массы образца при его окислении. Например, при $T_0 \approx 920$ К и $\eta \approx 0,1$ скорость испарения в гелий $\approx 0,34$ мкг/с, в вакуум (давление $\approx 10^{-3}$ мм рт. ст.) $\approx 0,36$ мкг/с, а мгновенная скорость окисления в $\text{CO}_2 \approx 0,41$ мкг/с. Кроме того, на стадии незащитного окисления значение кажущейся энергии активации $E \approx 150$ кДж/моль оказалось близким к значению теплоты испарения магния $\Delta H_v = 145,9$ кДж/моль.

фактивная поверхность значительно возрастает. Именно эти резкие изменения при достижении точки плавления металла приводят к режиму медленного гетерогенного горения.

Динамика дальнейшего развития процесса определяется, в основном, массопереносом жидкого магния через растущую пористую окисную пленку и его испарением с вогнутой поверхности менисков жидкости в порах. Хорошее смачивание жидким магнием собственного оксида [26] обеспечивает непрерывное впитывание металла в пористую пленку. Благодаря высоким скоростям капиллярного растекания реакция протекает на внешней поверхности образца до тех пор, пока весь исходный металл не израсходуется на образование и пропитку пленки. Наблюдения показывают, что рост пленки сопровождается увеличением как внешнего размера частицы, так и размера пузыря. Характерный же размер продуктов конденсации («зерен» пленки), как отмечалось выше, зависит, главным образом, от температуры и практически не меняется в ходе изотермического превращения. В этих условиях рост пленки приводит к непрерывному увеличению эффективной поверхности реакции и, следовательно, к макрокинетическому ускорению скорости окисления. Следует отметить, что дополнительным фактором самоускорения реакции является и увеличение в ходе процесса упругости пара магния над поверхностью менисков. При малых скоростях химического превращения и испарения магния высокая скорость капиллярного растекания металла обеспечивает динамическое равновесие в жидкости. Поэтому рост пузыря сопровождается уменьшением кривизны менисков жидкости в порах и, как следствие, увеличением давления пара над поверхностью металла.

Изложенный механизм объясняет и отмеченную выше особенность перехода от гетерогенного превращения к парофазному горению (см. рис. 4). Действительно, как следует из проведенного выше анализа, оптимальные для воспламенения условия достигаются при полном расходовании металла на образование и пропитку пленки. Именно этому моменту отвечают максимальные значения скорости окисления и давления пара над поверхностью менисков и минимальные теплотери во внешнюю среду (размер частицы к этому моменту максимален). Поэтому в критических условиях к моменту воспламенения металл практиче-

ски полностью выгорает в гетерогенном режиме и парофазное горение фактически сводится лишь к вспышке парового облака. При удалении от критических условий размер частицы после воспламенения не изменяется, вследствие чего парофазное горение подобно горению «шарового фитиля».

В заключение отметим, что сопоставление результатов, полученных в настоящей работе и в [18, 19], несмотря на различие их трактовок, позволяет сделать вывод, что как макрокинетическое самоускорение реакции при температуре выше температуры плавления металла, так и выделенные режимы превращения являются достаточно общими при окислении магния и не зависят от природы окислителя.

ВЫВОДЫ

При температуре среды выше точки плавления магния обнаружен режим медленного гетерогенного горения, в ходе которого масса образца увеличивается по закону, подобному автокаталитическому, а температура образца на $10 \div 20$ К превышает температуру окружающей среды. Область существования данного режима в шкале температур окружающей среды разделяет области медленного окисления и быстрого парофазного горения. Показано, что макрокинетическое самоускорение реакции в режиме медленного гетерогенного горения может быть связано с капиллярным растеканием магния по порам растущей окисной пленки и повышением упругости пара над поверхностью менисков жидкого металла в порах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-03-09829).

ЛИТЕРАТУРА

1. Yuasa S., Isoda H. Carbon dioxide breathing propulsion for a Mars airplane // AIAA Paper 89-2863. 1989.
2. Shafirovich E. Ya., Shiryaev A. A., Goldshleger U. I. Magnesium and carbon dioxide: a rocket propellant for Mars missions // J. Propulsion and Power. 1993. V. 9, N 2. P. 197-203.
3. Shafirovich E. Ya., Goldshleger U. I. Mars multi-sample return mission // J. Brit. Interplanetary Soc. 1995. V. 48. P. 315-319.
4. Шафирович Е. Я., Гольдшлегер У. И. Перспективы использования топлив «CO₂ — металл» в марсианских экспедициях // Внутрикамерные процессы, горение и газовая дина-

- мика дисперсных систем. Междунар. школа-семинар: Сб. лекций. СПб, 1996. С. 36–52.
5. **Шафирович Е. Я., Гольдшлегер У. И.** Воспламенение и горение частиц магния в углекислом газе // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 3–10.
 6. **Shafirovich E. Ya., Goldshleger U. I.** Combustion of magnesium particles in CO₂/CO mixtures // Combust. Sci. Technol. 1992. V. 84. P. 33–43.
 7. **Shafirovich E. Ya., Goldshleger U. I.** The superheat phenomenon in the combustion of magnesium particles // Combust. Flame. 1992. V. 88. P. 425–432.
 8. **Yuasa S., Isoda H.** Ignition and combustion of metals in a carbon dioxide stream // 22nd Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1988. P. 1635–1641.
 9. **Yuasa S., Fukuchi A.** Ignition and combustion of magnesium in carbon dioxide streams // 25th Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1994. P. 1587–1594.
 10. **Валов А. Е., Гусаченко Е. И., Шевцов В. И.** Влияние давления CO₂ и его концентрации в смесях с Ar на воспламенение одиночных частиц Mg // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 1. С. 9–12.
 11. **Fukuchi A., Kawashima M., Yuasa S.** Combustion characteristics of Mg — CO₂ counterflow diffusion flames // 26th Intern. Symp. on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1996. P. 1945–1951.
 12. **Friedman R., Macek A.** Ignition and combustion of aluminum particles in hot ambient gases // Combust. Flame. 1962. V. 6. P. 9–19.
 13. **Хайкин Б. И., Блошенко В. Н., Мержанов А. Г.** О воспламенении частиц металлов // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 4. С. 474–488.
 14. **Гуревич М. А., Степанов А. М.** Предельные условия воспламенения металлической частицы // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 2. С. 189–195.
 15. **Gregg S. J., Jepson W. B.** The high-temperature oxidation of magnesium in dry and in moist oxygen // J. Inst. Metals. 1959. V. 87. P. 187–203.
 16. **Зеленский В. Ф., Петельгузов И. А., Широченко С. Д.** Исследование процесса окисления магния // Высокотемпературная коррозия и методы защиты от нее. М.: Наука, 1973. С. 25–33.
 17. **Шевцов В. И.** Модель парофазного окисления частиц металлов // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 95–101.
 18. **Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А.** Режимы горения магния // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 3–10.
 19. **Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А.** Экспериментальное исследование критических условий воспламенения магния // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 6. С. 44–49.
 20. **Yuasa S., Isoda H.** Ignition of magnesium and magnesium-aluminum alloy by impinging hot-air stream // Combust. Sci. Technol. 1980. V. 21. P. 109–121.
 21. **Гольдшлегер У. И., Амосов С. Д.** О двух режимах воспламенения и горения капель углеводородных топлив // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 6. С. 854–859.
 22. **Баранов В. И.** Термогравиметрическая методика для исследования высокотемпературной кинетики взаимодействия конденсированных веществ: Дипломная работа ОИХФ АН СССР. Черноголовка, 1985.
 23. **Барре П.** Кинетика гетерогенных процессов. М.: Мир, 1976.
 24. **Окисление металлов.** Т. 1: Теоретические основы / Под ред. Ж. Бенара. М.: Металлургия, 1968.
 25. **Физические величины: Справочник** / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
 26. **Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В.** Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976.

*Поступила в редакцию 26/II 1997 г.,
в окончательном варианте — 7/IV 1999 г.*