

Рис. 2.

Для течения наружу в приведенных формулах следует заменить f_2 на $-g_2$, g_1 на $-f_1$. Кроме того, ввиду $\kappa \sim v_{1r}$ [4] меняется знак κ . В дальнейшем используется $\kappa \sim |v_{1r}|$.

На рис. 2 даны зависимости λ от μ при $x_{10} = 1$; 2 для течения внутрь (λ_1 — сплошные кривые) и наружу (λ_2 — штриховые). Области устойчивости находятся над этими кривыми. Потенциальному течению ($x_{10} = 0$) соответствуют значения $\lambda_1 = 1$ и $\lambda_2 = -1$ [3]. Можно аналитически показать, что

$$\lambda_1(\mu = 1) + \lambda_2(\mu = 1) = 0,$$

$$\lambda_1(\mu = 0) < \lambda_1(\mu = 1), \lambda_2(\mu = 0) = -1.$$

Наличие первоначальной завихренности для течения внутрь повышает устойчивость, а для течения наружу — понижает. При малой завихренности течение внутрь менее устойчиво, чем течение наружу, а при большой — наоборот. При уменьшении отношения плотностей продуктов сгорания и свежей смеси устойчивость для обоих течений возрастает.

Описанное поведение кривых $\lambda(\mu)$ в функции параметра x_{10} является естественным продолжением эволюции этих кривых в потенциальном случае [3]. Так, например, полученное в [3] решение для цилиндрического пламени в частном случае учета только осевых возмущений (в [3] этот случай соответствует значению номера азимутального возмущения $m = 0$ и физически означает наличие возмущений типа «перетяжек») в коротковолновом приближении ($kr_0 \rightarrow \infty$, $k = 2\pi/\Lambda$, Λ — длина волны возмущения) дает результат Ландау [3] $\kappa/k \rightarrow 1/2(1 - \mu)$ для течений как внутрь, так и наружу. В длинноволновом приближении ($kr_0 \rightarrow 0$) для течения внутрь имеет место $\kappa r_0 \rightarrow 1$ и наружу $\kappa r_0 \rightarrow -1$. Последующий учет первоначальной зависимости приводит к картине, описанной в данной работе.

Поступила в редакцию 13/1 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Ламб. Гидродинамика. М.—Л.: Гостехиздат, 1947.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.
3. П. П. Лазарев, А. С. Плешанов. ФГВ, 1983, 19, 1.
4. П. П. Лазарев, А. С. Плешанов. ФГВ, 1980, 16, 6.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ГОРЕНИЕ МАГНИЯ

М. Е. Дерезяга
(Винница)

Использование порошкообразных металлов в качестве горючего в энергетических установках обусловило проведение широких исследований по влиянию различных параметров на процесс их горения.

Изучалось также влияние давления на горение малых частиц [1—3] и лент [4] магния. Анализ конденсированных остатков после сгорания магниевых частиц в модельном двигателе [1] показал, что массовая доля остатков крупной фракции (порядка исходных размеров частиц) с увеличением давления возрастает. Время парофазного горения (время видимого свечения) капель магния, измеренное в [2], убывало с увеличением дав-

ления. Ранее аналогичные результаты получены в модельном двигателе торцевого горения [3]; обнаружено также, что время, необходимое для полного химического превращения частиц, существенно превосходит время их видимого свечения. Качественные наблюдения горения лент магния [4] при различных давлениях и концентрациях кислорода в окружающей среде показали, что при достаточно высоких давлениях вокруг ленты образуется полая трубка из окиси, после чего реакция прекращается. Авторы предполагают, что окисная оболочка непроницаема для кислорода. Следует отметить, что прекращение реакции может наступить и при частичном уменьшении доступа кислорода, так как в данном случае значителен теплоотвод в концы ленты, которые закреплены в металлических зажимах.

Из перечисленных работ достаточно определенно следует, что увеличение давления в окружающей окислительной среде способствует накоплению окиси вокруг горящего образца и уменьшению времени парофазного горения. Однако момент окончания процесса горения не вполне ясен. Авторы работы [2] считали, что окончание парофазного горения означает полное выгорание капли, как это имеет место при атмосферном давлении. В то же время из [3, 4] следует, что это не так. По имеющимся результатам нельзя представить даже качественную картину протекания процесса на заключительной стадии, которая может быть достаточно длительной и обуславливать недогорание металла.

В настоящей работе ставилась задача изучить (качественно и количественно) динамику процесса горения капли при различных давлениях окислительной среды и выявить влияние давления на механизм горения, используя более широкие возможности применяемой методики исследования.

В опытах использовались сферические образцы магния (чистота 99,9%) диаметром 6 мм. Большой размер образцов облегчает качественные наблюдения и позволяет в одном опыте измерить несколько параметров. В качестве окислительной среды использовался воздух и смеси кислорода с азотом или аргоном комнатной температуры. Исследование проведено в диапазоне давлений 0,1—2 МПа. Схема применяемой методики описана в [5]. Образец разогревался индукционным способом до момента воспламенения, а его саморазогрев и горение происходило без индукционного нагрева.

Подвешенный на термораре образец помещался в соленоид, который питался от высокочастотной установки. Образец изолировался от атмосферы с помощью трубки из кварцевого стекла (диаметром 26 мм), через которую продувался окислительный газ. Образец обдувался при постоянном объемном расходе газа, так что число Рейнольдса при различных давлениях было одинаковым. Скорость обдува при давлении 0,1 МПа во всех опытах составляла 60 см/с (выбрана произвольно). При повышении давления скорость снижалась обратно пропорционально давлению. В опытах непрерывно измерялась температура образцов с помощью вольфрам-ренийевых термопар (толщина 0,35 мм), сигнал с которых записывался на шлейфовом осциллографе. Измерялись также время горения (с помощью фотоэлемента), состав смеси и скорость потока. Конденсированные остатки на терморарах после сгорания образца подвергались микроскопическому, химическому и визуальному анализам. Проводилась киносъемка и визуальные наблюдения горения. Ошибка измерения температуры составляла $\pm 0,5\%$. Скорость потока определялась с точностью $\pm 0,5\%$, а состав смеси — $\pm 1\%$.

В результате исследования при повышенных давлениях выделено две стадии процесса горения капель магния и прослежена динамика их протекания.

На первой стадии, как известно [2—4], реализуется режим парофазного горения. Киносъемка этого режима горения, а также визуальные наблюдения позволили зафиксировать процессы, которые со временем изменяют характер горения. Так, во время парофазного горения вокруг кап-

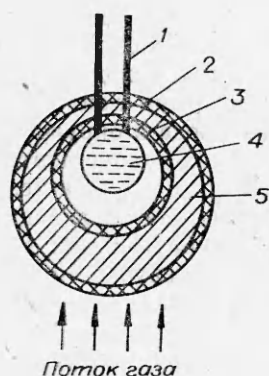


Рис. 1. Схема окисного остатка на второй стадии процесса горения.

1 — термопара; 2 — наружная окисная оболочка; 3 — внутренняя окисная оболочка; 4 — капля жидкого металла; 5 — пористый остаток.

ли в зоне наиболее яркого свечения (зоне конденсации) образуется окисная оболочка, которая со временем полностью закрывает каплю. Можно полагать, что появление оболочки обусловлено спеканием мелкодисперсных окисных продуктов, поскольку этот процесс происходит в высокотемпературной области. Оболочка растет по направлению с тыльной части в лобовую. При этом она вытесняет ярко светящуюся зону конденсации, т. е. там, где уже есть оболочка, нет ярко светящейся зоны. В дальнейшем будем называть ее внешней оболочкой. Одновременно на поверхности капли образуется еще одна окисная оболочка (внутренняя). Вначале на поверхности появляются островки из окиси, которые со временем увеличиваются в ширину и высоту и в некоторых местах соединяются. По-видимому, рост таких островков происходит за счет осаждения мелкодисперсных продуктов горения из зоны конденсации на поверхность капли. Парофазное горение исчезает, когда внешняя оболочка полностью закрывает каплю.

При полном прекращении парофазного горения капля не погасает. Окисный остаток раскаляется, т. е. достаточно интенсивная химическая реакция начинает протекать внутри остатка. Этот этап горения отнесен ко второй стадии. Значительный разогрев окисного остатка на второй стадии фиксировался визуально. Термопара на протяжении всего процесса горения регистрирует температуру капли. Эта температура на второй стадии горения постепенно снижалась до ~ 1100 К (хотя остаток раскалялся), что свидетельствует о постепенном снижении скорости горения. Когда капля полностью выгорает, яркость свечения остатка и температура, фиксируемая термопарой, быстро снижаются.

На основании результатов киносъемки, визуальных наблюдений и анализа конденсированных остатков на термопарах после полного выгорания капель можно представить структуру остатка и предположить механизм протекания процесса горения на второй стадии (рис. 1).

Остаток содержит внутреннюю пустотелую оболочку, внутренний диаметр которой меньше исходного размера образца и составляет ~ 5 мм. Наружная оболочка, образовавшаяся в зоне конденсации, превосходит размер капли примерно в 1,4 раза. Пространство между оболочками заполнено пористым веществом темно-серого и желтоватого (горение в воздухе) или только темно-серого цвета (горение в смеси аргона с кислородом). Химический анализ пористого вещества, полученного после сгорания капли в смеси аргона с кислородом при давлении 1 МПа (объемная доля кислорода $c = 0,21$), показал, что в нем содержится 3,8% (от начального веса образца) активного металла. Этим и объясняется темно-серый цвет вещества в пористом слое.

Для существования зоны парофазной реакции необходимы вполне конкретные интенсивности массопотоков (кислород, пары металла) и теплоток (к капле и в окружающую среду). Образующиеся окисные оболочки затрудняют интенсивный тепло- и массообмен, в результате чего самоподдерживающееся парофазное горение прекращается. Однако жидкий металл еще нагрет до высокой температуры и испаряется, а кислород диффундирует через внешнюю оболочку, хотя и менее интенсивно. Эти два потока встречаются в пространстве между внутренней и наружной оболочками и реагируют, в результате чего окисный остаток раскаляется. Поскольку мелкодисперсные окисные продукты, характерные для парофазного горения, не обнаружены в пористом слое и во внутренней полости оболочки, можно предположить, что пары металла конденсиру-

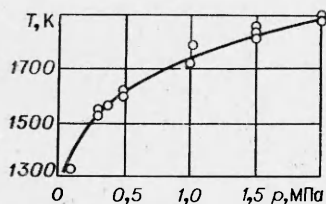


Рис. 2. Зависимость установившейся температуры капли при парофазном горении от давления в потоке воздуха.

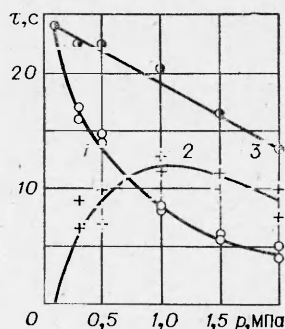


Рис. 3. Зависимость времен существования первой (1) и второй (2) стадий горения, а также суммарного (3) времени горения капли от давления в потоке воздуха.

ются на поверхности окисных образований в пористом слое и там реагируют с диффундирующим кислородом, т. е. реакция металл — кислород протекает не в газовой фазе, а на поверхности окисных образований. Постепенное снижение скорости горения (на что указывает снижение температуры капли), очевидно, обусловлено постепенным зарастанием пор в окисных оболочках и уменьшением диффузионных потоков реагентов. Это обстоятельство может являться причиной обнаруженного недогорания металла.

В результате исследования обнаружили некоторые характерные особенности горения капель магния при повышенных давлениях и в режиме парофазного горения (первая стадия). Оказалось, что температура капли постоянна и близка к температуре кипения магния при данном давлении [6]. Результаты измерений этой температуры в зависимости от давления окружающей газовой среды (воздух) представлены на рис. 2. В [7] обнаружено, что при атмосферном давлении температура в процессе выгорания капли в парофазном режиме непрерывно увеличивается, стремясь к температуре кипения металла. В настоящей работе получено, что при повышенных давлениях после воспламенения капля быстро «набирает» максимальную температуру, которая практически постоянна на первой стадии горения и постепенно снижается на второй стадии.

На рис. 3 приведены результаты измерения времен существования первой и второй стадий, а также суммарного времени горения капли в зависимости от давления в окислительной среде. На основании проведенных экспериментов можно указать факторы, которые, по-видимому, определяют наблюдаемые зависимости. Длительность времени парофазного горения зависит от скорости образования внешней окисной оболочки. С повышением давления увеличивается температура кипения, а следовательно, и упругость паров металла, что влечет за собой рост концентрации конденсированных продуктов в зоне конденсации. Этот фактор способствует сокращению времени на образование внешней окисной оболочки, т. е. времени существования первой стадии горения. Кривая 1 качественно аналогична зависимости, полученной в [2], где использовались частицы магния меньших размеров. Однако в [2] не упоминается о наличии второй стадии горения.

Время существования второй стадии имеет максимум. Можно полагать, что слева от него время горения на этой стадии меньше из-за небольшого количества металла, оставшегося после первой стадии, где времени горения еще велики. Справа от максимума уменьшение времени горения можно связать с более высокими температурами капель, при которых наступает вторая стадия с повышением давления. Кроме того, увеличение давления способствует усилению свободной конвекции. Две последние причины могут объяснить и зависимость общего времени от давления.

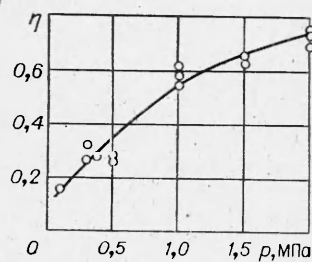


Рис. 4. Зависимость отношения массы окисных остатков на термопарах к общему количеству продуктов сгорания (η) от давления в потоке воздуха.

На рис. 4 представлена зависимость отношения массы окисных остатков на термопарах к общему количеству продуктов сгорания от давления в окислительной атмосфере. Видно, что с увеличением давления масса окисных остатков увеличивается. Этому, по-видимому, способствует более быстрое образование наружной окисной оболочки. В результате значительная часть металла сгорает в режиме, характерном для второй стадии горения, при которой окисел не улетает в газовый поток. Полученная зависимость для η качественно согласуется с результатами работы [1], где для исследования использовались частицы магния со среднеобъемным диаметром 11,6 мкм.

Точно измерить долю металла, сгорающую во второй стадии, а также массовую скорость горения капли в режиме парофазного горения в зависимости от давления не удалось, так как в данных условиях на поверхности капли быстро образуются выступы из окиси, что затрудняет обработку кинокадров. Кроме того, вблизи момента перехода ко второй стадии горения капля вообще закрыта внешней окисной оболочкой.

Общая картина горения при более высоких концентрациях кислорода ($c = 0,5$) в смеси азот — кислород в том же интервале давлений качественно не отличается от описанной выше. Длительность первой стадии горения имеет тот же порядок, а вторая стадия короче. При давлениях 0,3—0,5 МПа внутренняя оболочка окисного остатка присутствует только в лобовой части. Наружная оболочка превосходит исходный размер капли примерно в 1,6 раза, т. е. в том случае больше металла сгорает в парофазном режиме. При более высоких давлениях окисный остаток аналогичен описанному выше при горении в воздухе. Значение $\eta = 0,81 \div 0,85$ при изменении давления от 0,5 до 2 МПа. Согласно [7], с повышением концентрации кислорода масса окисного остатка увеличивается и при атмосферном давлении.

Горение образцов магния в смеси кислорода ($c = 0,21$) с аргоном имеет некоторые особенности. В смеси кислород — азот при саморазогреве образца его поверхность сначала вспенивается, а затем он принимает форму капли [7]. При замене азота на аргон также наблюдается вспенивание поверхности, однако образец не принимает форму капли, а вспенившаяся поверхность фиксируется в некотором состоянии. На ней появляются горячие очаги, а затем вокруг образца возникает зона парофазного горения. Вид поверхности вспенившегося образца сохраняется в процессе горения, и вокруг него также образуется наружная окисная оболочка, которая подавляет парофазное горение. Вторая стадия горения протекает так же, как и в воздухе. Аналогично ведет себя и температура капли со временем, однако в данном случае средний уровень температуры на $30\text{—}50^\circ$ ниже. В связи с этим общее время горения на $20\text{—}25\%$ больше. Зависимость веса окисного остатка от давления соответствует результатам, приведенным на рис. 4.

Как уже отмечалось, результаты, полученные на крупных образцах, обнаруживают качественную аналогию (по ряду зависимостей) с результатами [1—3] на малых частицах. Использование крупных образцов дало возможность наглядно наблюдать процесс горения на всех стадиях. Это позволило впервые выделить еще одну стадию горения (вторую), существующую при повышенных давлениях. Она может существенно удлинять общее время горения. С учетом этой стадии легко объяснить, почему в [3] время, необходимое для полного химического превращения микрочастиц, существенно превосходило время видимого их свечения. Следует отметить, что яркость свечения капли на первой стадии горения много-

кратно превосходит яркость ее свечения на второй стадии. Очевидно, поэтому вторая стадия горения малых частиц не зарегистрирована ранее с помощью фото- и киносъемки.

Поступила в редакцию 17/VII 1980,
после доработки — 22/VII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Гусаченко, Л. Н. Стесик и др. ФГВ, 1974, 10, 4, 548.
2. В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.
3. П. В. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
4. Т. Бржустовский, И. Гласмен.— В кн.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
5. М. Е. Деревяга, Л. И. Стесик. ФГВ, 1981, 18, 2, 64.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
7. М. Е. Деревяга, Л. Н. Стесик, Э. А. Федорин. ФГВ, 1978, 14, 5, 3.

ОБРАЗОВАНИЕ ФОСФИДА Co_2P В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

С. В. Мучник, К. А. Лыничак, А. Н. Дубров

(Киев)

При горении системы $Co-P$ получают соединения Co_2P , CoP и CoP_3 [1], два первых могут быть получены в режиме горения, причем для синтеза стехиометрического состава Co_2P при нормальном давлении аргона необходима исходная смесь с некоторым избытком фосфора (21,5% против 20,79%) [2].

Настоящие эксперименты проводились на порошках электролитического кобальта и красного фосфора дисперсностью менее 40 мкм по методике, описанной в [3]. Диаметр прессовок составлял 20 мм, относительная плотность — 0,43, что обеспечивало адиабатический режим горения. Внешний вид образцов после реакции показан на рис. 1. Горение проходило в автоколебательном режиме, о чем свидетельствует расслоение образцов. По данным рентгенофазового анализа, сосуществующими фазами являлись только Co и Co_2P .

Характерная особенность горения составов с массовым содержанием фосфора 15—19% — удлинение и некоторое расширение образцов. Это потребовало пересчета значений скорости горения для учета изменения размеров, аналогично тому, как это сделано в [4] при оценке реальной скорости горения в системе $Ti-V$. На рис. 2 приведены полученные значения массовых скоростей и температур горения в исследуемой области, совмещенные с участком диаграммы состояния системы $Co-P$ [5]. Каждая точка получена при обработке методом наименьших квадратов результатов 5—8 опытов.

С помощью приближенной методики [6] и термодинамических данных для Co_2P [7] после расчета теплоты плавления (исходя из близости энтропий плавления изоструктурных Co_2P и Co_2Si [8], в соответствии с [9]), которая составила 65 кДж/моль, найдено, что адиабатическая температура горения при образовании Co_2P должна быть несколько больше или

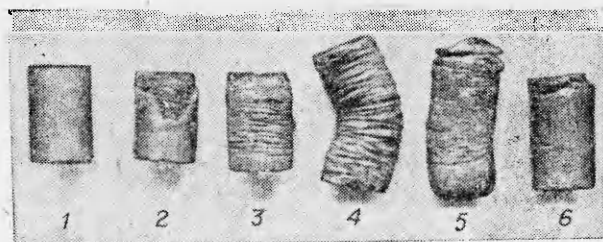


Рис. 1. Внешний вид образцов системы $Co-P$ после горения.

Массовая доля связанного фосфора, %: 1 — 11, 2 — 14, 3 — 15, 4 — 16, 5 — 18, 6 — 21.