

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Cohen, R. Bromberg, R. P. Lipkis. Jet Propulsion, 1958, 28, 10, 659.
2. G. A. Marxman, M. Gilbert. Ninth Symposium (International) on Combustion, Academic Press, 1963.
3. G. A. Marxman, C. E. Wooldridge, R. I. Muzzy. Heterogeneous Combustion, AIAA Progress in Astronautics and Rocketry. V. 15, Academic Press, N. Y., 1964.
4. G. A. Marxman. Tenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1965.
5. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10, 1199.
6. Ф. А. Агафонова, М. А. Гуревич, И. И. Палеев. ЖТФ, 27, 8, 1818.
7. E. Miller. AIAA J., 1966, 4, 247.
8. Л. Лиз. Сб. «Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций». М., ИЛ, 1962.
9. У. Х. Дорренс. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М., «Мир», 1966.
10. F. Williams. Combustion and Flame, 1961, 5, 2, 207—209.
11. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Методы теории функций комплексного переменного. М., Физматгиз, 1958.
12. С. Е. Wooldridge, R. I. Muzzy. Tenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1965.
13. С. Е. Wooldridge, R. I. Muzzy. AIAA J., 1966, 11, 2009.
14. L. D. Smoot, G. F. Price. AIAA J., 1963, 3, 1408—1413.
15. Д. Б. Сполдинг. Основы теории горения. М., Госэнергоиздат, 1959.
16. F. I. Kosdon, F. A. Williams. AIAA J., 1967, 5, 4, 774.

УДК 536.46+662.215.3

### ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ НА ИХ ГОРЕНИЕ<sup>1</sup>

*А. С. Дубровин, Л. В. Слепова, В. Л. Кузнецов*  
(Челябинск)

Плотность алюминотермических составов существенно влияет на скорость и полноту восстановительных реакций [1—4]. В работах [5, 6] указывается, что по характеру зависимости скорости горения от плотности составов можно выяснить роль процессов, протекающих в конденсированной или газовой фазах. Считается [5], что если в процессе горения газы не образуются или их образуется очень мало, то массовая скорость практически не зависит от плотности составов. Однако опыты показывают, что значительные изменения скорости в зависимости от плотности наблюдаются и для таких составов, при горении которых исключена возможность заметной газификации реагентов или продуктов реакции.

Согласно [7], влияние плотности конденсированных взрывчатых веществ на скорость горения связано с изменением условий распространения тепла в порошкообразной смеси реагентов. При этом условия переноса тепла меняются как в результате изменения теплопроводности порошка, так и в результате изменения его проницаемости для материальных носителей тепла — жидких (расплав вещества) или газообразных (продукты испарения и распада).

Представления, развитые для горения взрывчатых веществ, могут использоваться также для анализа металлотермических процессов. При этом необходимо учитывать свойства реагентов и продуктов реакции,

<sup>1</sup> В работе принимали участие В. И. Езиков и И. М. Иоффе.

предопределяющие долю различных видов передачи тепла в общем тепловом потоке.

Исследовалась зависимость скорости горения от плотности шихты алюминотермических смесей окислов хрома и железа. Величина максимальной температуры горения ( $T_{\max}$ ) рассчитывалась из условия полного восстановления окислов и отсутствия тепловых потерь во время процесса. Добавка к смеси окиси хрома и алюминия железотермитной смеси повышала  $T_{\max}$  до  $2700^\circ\text{K}$ , что близко к температуре производственных процессов алюминотермической выплавки хрома, ферровольфрама, ферроникобия и др.

Плотность составов изменялась прессованием шихты в магнетитовых тиглях внутренним диаметром 60 и высотой 150 мм; вес шихты 400—600 г. Скорость процесса ( $u_{\max}$ ) определялась фиксированием времени от момента вспышки запальной смеси (20 г перекиси бария и 2,5 г алюминия) до начала показаний термопары, установленной на дне тигля. При использовании одних и тех же материалов различие в результатах параллельных определений скорости составляло не более 10%. В опытах использовались следующие шихтовые материалы: 1) техническая окись хрома (98,5%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , средний размер зерен 2—5 мкм); 2) измельченная железная руда (89,3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 8,7%  $\text{SiO}_2$ ); 3) алюминиевый порошок (99,2% Al), полученный пульверизацией жидкого алюминия; 4) хлористый натрий (99% NaCl).

Размер зерен узких фракций, получающихся при расसेве на приборе 0-26M, определялся как среднее арифметическое диаметров отверстий ограничивающих сит. Средний диаметр полидисперсных порошков ( $d_{\text{cp}}$ ) рассчитывали как среднее арифметическое, взвешенное по поверхности зерен [8].

На рис. 1 представлены результаты опытов с составами, отличающимися температурой (количеством железоалюминиевого термита в смеси). В данной серии опытов применяли полидисперсный порошок алюминия с зернами до 1 мм ( $d_{\text{cp}} = 0,22$  мм). При небольших добавках железной руды быстрее реагируют уплотненные составы. Однако при количестве добавок руды, превышающем 17% ( $T_{\max}$  более  $2500^\circ\text{K}$ ), положение меняется, и с большей скоростью горят рыхлые составы. По мере дальнейшего увеличения количества добавки руды, а следовательно, и температуры процесса, разница в скоростях возрастает.

Максимумы на кривых скорости — количество добавки руды обнаружены ранее [9] при проведении опытов в атмосфере аргона и гелия. В данном случае также можно предположить, что положение максимума скорости соответствует определенному соотношению между скоростью тепловыделения и теплопроводностью шихты. Увеличение доли железоалюминиевого термита в смеси приводит к повышению температуры процесса и поэтому должно способствовать ускорению химических реакций. С другой стороны, в настоящих опытах зерна руды и алюминия крупнее зерен окиси хрома, при их добавке увеличивается размер воздушных промежутков между зернами<sup>1</sup> и, следовательно, вероятно возрастание теплопроводности шихты [10]. Последнее, по-видимому, приводит к возрастанию протяженности зоны подогрева и снижению скорости горения некоторых составов [9].

Было исследовано горение составов при различной крупности алюминия: 1,0—0,6 мм; 0,6—0,4; 0,4—0,315; 0,315—0,20; 0,20—0,16 и менее 0,16 мм (рис. 2). Применяли железную руду с размером зерен менее 0,6 мм ( $d_{\text{cp}} = 0,08$  мм). Варианты шихты указаны в табл. 1.

<sup>1</sup> Объемный вес шихты при добавке руды до 60% от веса окиси хрома увеличивался на 0,35—0,40 г/см<sup>3</sup>.

При размерах зерен алюминия менее 0,6 мм непрерывное возрастание скорости по мере уплотнения характерно для сравнительно низкотемпературных составов ( $T_{\max} < 2400^\circ\text{K}$ )<sup>1</sup>. Повышение температуры горения меняет характер зависимости скорости от плотности: высокая скорость наблюдается либо для рыхлых, либо для сильно уплотненных составов. При крупности зерен алюминия 0,6—1,0 мм непрерывное возрастание скорости с уплотнением характерно для составов с температурой до 2620° К. Для составов с  $T_{\max} = 2700^\circ\text{K}$  наблюдали максимум скорости при промежуточной степени уплотнения.

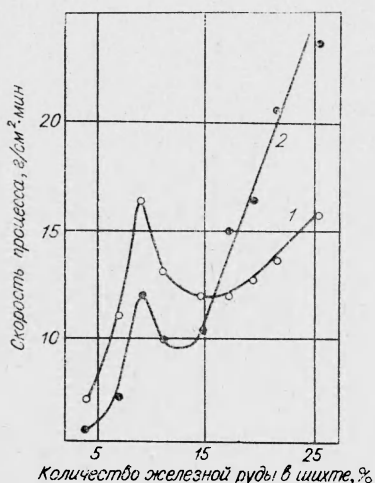


Рис. 1. Скорость процесса в зависимости от количества добавки в шихту железной руды. Размеры зерен полидисперсных порошков ( $d_{\text{ср}}$ ): руды — 0,083 мм, алюминия — 0,22 мм.

1 — уплотненные составы ( $\gamma$  возрастает от 1,45 до 1,80  $\text{г/см}^3$ ); 2 — неуплотненные составы ( $\gamma$  возрастает с добавкой руды от 1,20 до 1,60  $\text{г/см}^3$ ).

Для анализа полученных данных рассмотрим возможные изменения теплопроводности в связи с уплотнением шихты.

Коэффициент теплопроводности дисперсных сред ( $\lambda_{\text{эфф}}$ ) складывается из кондуктивной составляющей ( $\lambda_{\text{к}}$ ), конвекции ( $\lambda_{\text{конв}}$ ) и излучения ( $\lambda_{\text{изл}}$ ). При низких температурах передача тепла осуществляется в основном кондуктивным путем, причем  $\lambda_{\text{к}}$  возрастает по мере уплотнения дисперсных порошков, но снижается с уменьшением размера воздушных промежутков между зернами [10].

<sup>1</sup> Для низкотемпературных составов подобный характер зависимости сохраняется и при весьма дисперсном алюминии ( $d = 0,3\text{--}5\ \mu\text{м}$ ) [11].

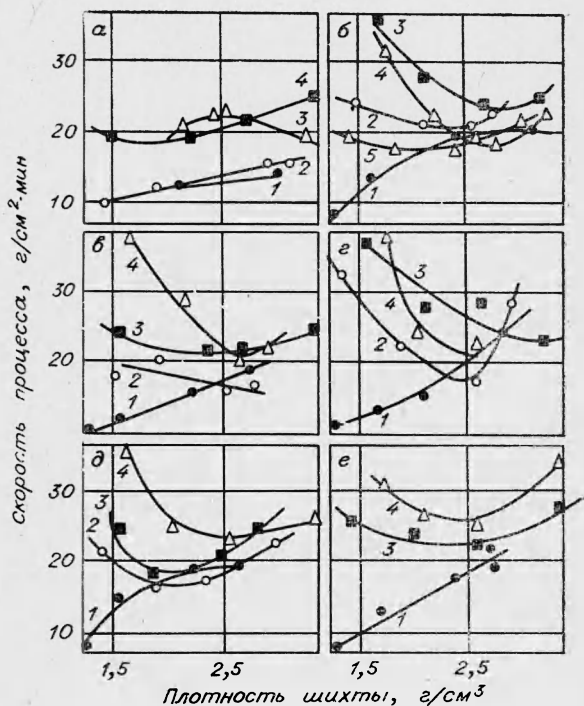


Рис. 2. Влияние плотности шихты на скорость горения хром-железоалюминиевых термитов при различной крупности алюминия. Цифры у кривых — номера вариантов шихты (см. табл. 1).  $d_{\text{ср}}$ , мм: а — 0,8; б — 0,26; в — 0,5; г — 0,18; д — 0,36; е — 0,08.

Из полученных результатов (табл. 2)<sup>1</sup> видно существенное возрастание теплопроводности составов с их уплотнением. Видно также, что теплопроводность увеличивается при добавлении к окиси хрома алюминиевого порошка. Полученные данные позволяют считать, что протяженность зоны прогрева шихты перед реакцией будет непрерывно возрастать по мере уплотнения состава.

Экспериментальное определение теплопроводности алюминотермических составов при температуре выше 800—900°С невозможно ввиду их возгорания. Для качественной оценки изменений теплопроводности

Таблица 1

Варианты	Состав шихты, г			T <sub>max</sub> , °К
	окись хрома	железная руда	алюминий	
1	250	32,5	93,4	2400
2	250	96,0	118,0	2550
3	250	144,0	133,0	2620
4	250	192,0	148,0	2700
5	250	73,0	111,5	2480

в связи с ростом температуры можно использовать общие закономерности, установленные для дисперсных сред. Известно, что теплопроводность дисперсных порошков слабо зависит от природы зерен [13], а повышение температуры резко увеличивает передачу тепла излучением и конвекцией [10, 14]. В отличие от  $\lambda_k$  величины  $\lambda_{изл}$  и  $\lambda_{конв}$  уменьшаются по мере уплотнения дисперсных порошков. Поэтому в общем случае не наблюдается непрерывного роста  $\lambda_{эфф}$  с увеличением объемного веса порошков, а отмечается более сложный вид функции  $\lambda_{эфф} = f(\gamma)$ : вначале при возрастании  $\gamma$  величина  $\lambda_{эфф}$  падает, достигая минимума, а затем растет [10, 14]. Минимум теплопроводности имеет место при условии  $\frac{d(\lambda_{изл} + \lambda_{конв})}{d\gamma} = \frac{d\lambda_k}{d\gamma}$ . Объемный вес  $\gamma$ , при котором теплопроводность минимальна, является функцией температуры, давления, крупности составляющих дисперсного материала и других параметров, определяющих теплопередачу.

Для температур, когда передача тепла излучением и конвекцией невелика при реальных значениях плотности составов, минимум тепло-

Таблица 2

Материал	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности 10 <sup>-6</sup> кдж/м·сек·град		
		300°С	500°С	700°С
Окись хрома	1,2	16	17	18
	1,6	21	22	23
	2,0	26	27	28
	2,4	31	32	33
Окись хрома + алюминий*	1,2	22	23	24
	1,6	32	33	34
	2,0	44	45	47
	2,4	66	70	73

\* Алюминий с размерами 0,2—0,315 мм взят в количестве, необходимом для полного восстановления окисла.

<sup>1</sup> Теплопроводность определялась методом регулярного режима [12].

проводности может не наблюдаться. С повышением температуры при усилении передачи излучением или конвекцией минимум теплопроводности смещается в область больших объемных весов [14].

Для большинства изученных высокотемпературных составов положение минимума, а также темп снижения скорости процесса по мере уплотнения составов (см. рис. 2) качественно соответствуют предполагаемому виду функции  $\lambda_{эфф} = f(\gamma, T)$ . Так, с повышением температуры горения составов минимумы скорости сдвигаются в сторону больших объемных весов, а падение скорости на левых ветвях кривых  $u_{max} = f(\gamma)$  становится более резким.

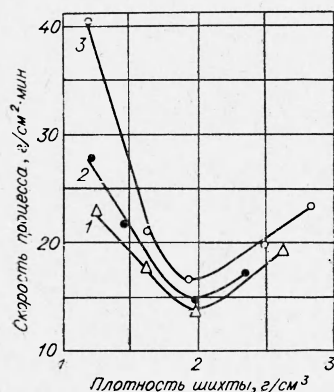


Рис. 3. Влияние крупности зерен железной руды на горение состава.

Крупность зерен руды  $d_{з.р.}$ , мм:  
1 — 0,057 (менее 1,0 мм); 2 — 0,050 (менее 1,0 мм); 3 — 0,040 (менее 0,315 мм); крупность зерен алюминия — 0,16 (менее 0,315 мм).

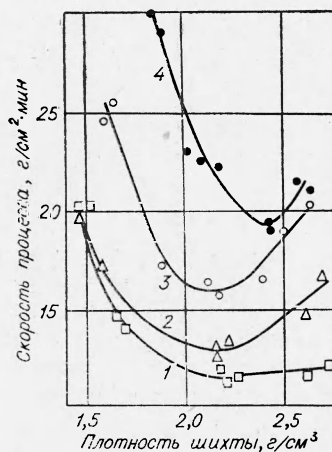


Рис. 4. Зависимость скорости горения состава 4 (см. табл. 1) от плотности шихты при различном давлении азота.

Давление, бар: 1 — 0,001; 2 — 1,0; 3 — 2,0; 4 — 3,6 (крупность алюминия — 0,315—0,40 мм, железной руды 1,0 мм).

Поскольку  $\lambda_{изл}$  и  $\lambda_{конв}$  возрастают с увеличением размера воздушных промежутков между зернами [10], при укрупнении компонентов шихты следует также ожидать большего падения скорости на левой ветви кривой, описывающей зависимость скорости от плотности. Последнее хорошо подтверждается при горении составов с одинаковой  $T_{max}$ , но при различной крупности зерен железной руды (рис. 3). Существенное влияние крупности реагентов на скорость и вид зависимости  $u_{max} = f(\gamma)$  следует также из последующих экспериментов, выполненных для одного состава шихты, но при различной крупности железной руды (рис. 4, 5).

Температура горения изученных составов ниже температуры кипения любого из реагентов или продуктов реакции. Однако в конвективном переносе тепла могут участвовать не только продукты газификации реагентов или продуктов реакции, но также и газы, заполняющие промежутки между зернами, адсорбированные газы и влага. Полученные в серии опытов зависимости скорости процесса от плотности шихты при разном давлении газов, заполняющих реактор<sup>1</sup> (см. рис. 4), не позволяют считать конвективный перенос значительным в случае горения

<sup>1</sup> Методика проведения опытов описана в работе [9].

изученных термитов. О слабом участии образующихся в процессе газов свидетельствуют близкий к параллельному ход левых ветвей кривых, приведенных на рис. 4, и малое различие скоростей в вакууме и при нормальном давлении.

Поскольку во время горения высокотемпературных составов (составы 3 и 4) продукты реакции (шлак и металл) перегреты сверх температуры плавления, следует рассмотреть также возможность их просачивания в глубь шихты. Проникновение жидких расплавов в порошок реагентов определяется их жидкоподвижностью и величиной капиллярного давления и должно поэтому интенсифицироваться с повышением

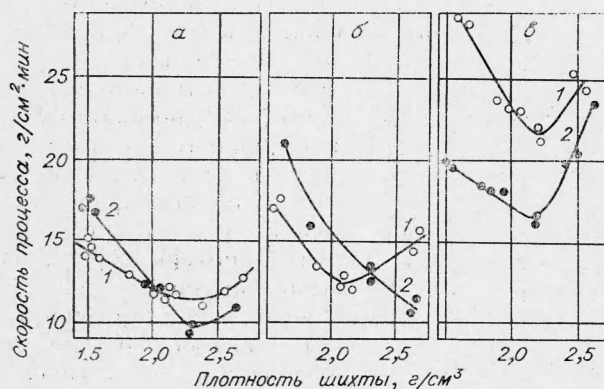


Рис. 5. Влияние плотности и давления на горение хром-железо-алюминиевых термитов. Крупность зерен алюминия 0,315—0,40 мм, железной руды — менее 0,63 мм.  
1 — состав 4; 2 — состав 4 с добавкой 10% NaCl (от веса алюминия в шихте). Давление, бар: а — 0,001; б — 1,1; в — 3,6.

температуры процесса, с увеличением размеров воздушных промежутков между зернами и по мере снижения внешнего давления. Увеличение спада скорости с повышением температуры горения, а также с укрупнением зерен железной руды не противоречит предположению о передаче тепла расплавом (см. рис. 2, 3). Однако малое различие скорости горения рыхлых составов в вакууме и при нормальном давлении, а также близкий к параллельному ход левых ветвей кривых плотность шихты — скорость процесса (рис. 4) позволяют считать, что передача тепла при просачивании жидких расплавов не является решающей.

Следовательно, для изученных составов основными видами передачи тепла можно считать контактную теплопроводность и излучение. Ускорение процесса с повышением давления азота, по-видимому, следует объяснить увеличением контактной теплопроводности (в связи с передачей тепла от одной твердой частицы к другой через промежуточную газовую среду [15]). Этому предположению соответствуют близкий к параллельному ход левых ветвей, а также наблюдаемое в области больших объемных весов возрастание наклона правых ветвей изобарных кривых  $u_{\max} = f(\tau)$  по мере повышения давления азота.

Применяемые в практике металлотермические составы имеют различные свойства используемых реагентов и получаемых продуктов реакции, поэтому в некоторых из них роль газообразных и жидких носителей тепла может быть значительной. По-видимому, проникновения жидкости-теплоносителя в порошок реагентов следует ожидать при наличии в шихте легкоплавких составляющих или при образовании в

результате реакций легкоплавкого металла, значительно перегретого сверх температуры его плавления.

В работе [9] высказано предположение об участии в теплопереносе газообразных продуктов разложения натриевой селитры или бертолетовой соли, образующихся в процессе алюминотермической выплавки хрома.

В некоторых опытах, проведенных нами при различном давлении, в состав термита ( $T_{\max} = 2700^\circ$ ) введен хлористый натрий, кипящий при  $1738^\circ \text{K}$  (см. рис. 5). При испарении солевой добавки количество газов, участвующих в переносе тепла, резко возрастает, что интенсифицирует передачу тепла конвекцией. Участием паров в теплопереносе можно объяснить резкую зависимость скорости процесса от объемного веса в вакууме и при нормальном давлении (см. рис. 5, а, б). При повышенном давлении (см. рис. 5, в) условия для конвективного переноса тепла парами  $\text{NaCl}$ , по-видимому, ухудшаются, что приводит к замедлению спада скорости в области рыхлых составов.

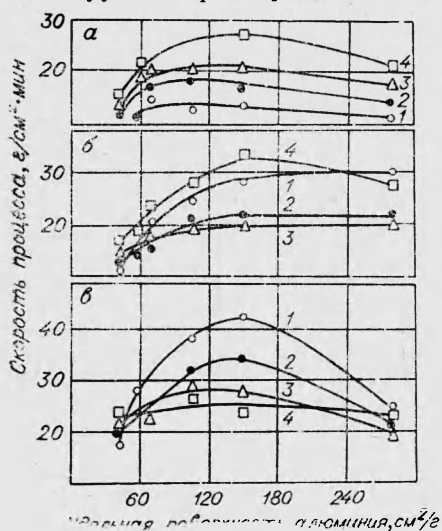


Рис. 6. Влияние крупности зерен алюминия на скорость горения составов. Крупность железной руды  $< 0,6 \text{ мм}$ .

а —  $T_{\max} = 2400^\circ \text{K}$ , б —  $T_{\max} = 2550^\circ \text{K}$ ;

в —  $T_{\max} = 2629^\circ \text{K}$ .

Плотность шихты,  $\text{г/см}^3$ : 1 — 1,5; 2 — 2,0; 3 — 2,5; 4 — 3,0.

Ускорение процессов при измельчении зерен алюминия наблюдалось в ряде работ [4, 16, 17]. Из описанных выше опытов (см. рис. 2) можно установить характер зависимости скорости горения составов с различной плотностью от крупности алюминия (рис. 6). Ускорение процессов при измельчении алюминия в общем случае возрастает при увеличении температуры горения. Наличие максимумов на кривых скорость — удельная поверхность алюминия<sup>1</sup> становится понятным, если принять во внимание, что измельчение алюминия приводит не только к увеличению его поверхности, но и одновременно может уменьшить теплопроводность шихты.

Для низкотемпературных составов сдвиг максимумов скорости в сторону более тонких порошков алюминия увеличивается по мере уплотнения. Наиболее высокая скорость горения высокотемпературных составов наблюдается либо при рыхлой, либо при значительно уплотненной шихте. Следовательно, эффект ускорения с измельчением алюминия увеличивается при обеспечении интенсивной передачи тепла. По мнению [11], при чрезвычайно дисперсных реагентах (0,3—5,0  $\mu\text{м}$ ) реакции в ряде термитов могут протекать в кинетическом режиме (отсутствует зависимость скорости процесса от крупности реагентов). Увеличение дисперсности компонентов смеси приводит к уменьшению теплопроводности составов, сужению зоны горения и должно способствовать протеканию реакции при температурах, приближающихся к максимальной температуре горения. Поэтому в случае тонкодисперсных реагентов имеется принципиальная возможность применения для анализа горения термитов закономерностей

<sup>1</sup> Удельная поверхность алюминия подсчитана при допущении сферической формы частиц после их расплавления [16].

тепловой теории горения. Очевидно, что с укрупнением реагентов использование закономерностей теории горения, основанных на допущении протекания реакций при температуре, близкой к максимальной, становится менее обоснованным.

Из рассмотрения опытных данных следует, что во многих случаях увеличение теплопроводности способствует ускорению процессов. Для определенного состава может существовать некоторое оптимальное значение теплопроводности, превышение которого вызовет чрезмерное расширение зоны реакции. Последнее наряду с увеличением тепловых потерь из зоны реакции уменьшит долю веществ, взаимодействующих при высоких температурах, и приведет к снижению скорости тепловыделения [9]. В этом случае ускорения процесса можно достичь, принимая меры для уменьшения теплопроводности шихты см. рис. 2, ( $d_{ср} = 0,80$  мм) или интенсификации взаимодействия реагентов, например, путем введения солевых добавок-активаторов.

Условия горения должны влиять на полноту протекания металлотермических реакций.

В случае расширения зоны горения при повышении теплопроводности шихты можно ожидать лучшего развития капиллярной пропитки жидким алюминием порошка окислов [18], т. е. дополнительного возрастания эффективной поверхности контакта реагентов. Возможно, что именно увеличением контактной поверхности реагентов в условиях повышенной теплопроводности шихты объясняются результаты, представленные на рис. 7. Кривые, описывающие изменение остаточного содержания  $SiO_2$  в шлаке в зависимости от плотности шихты, являются как бы обратным отображением скорости: большая полнота реакции обеспечивается при высокой скорости процесса, т. е. при повышенной теплопроводности смеси.

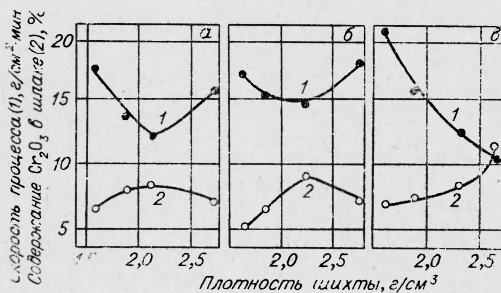


Рис. 7. Влияние плотности шихты на скорость и полноту протекания процесса (опыты при давлении 1,1 бар). Крупность алюминия — 0,315—0,4 мм.

а — состав 4; б, в — состав 4 с добавкой соответственно 5 и 10% NaCl (от веса алюминия в шихте).

Поступила в редакцию  
29/VII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Дубровин, Э. А. Кнышев, Ю. Л. Плинер. Сб. Теория и практика металлургии. Вып. VI. Челябинск, 1963.
2. А. С. Дубровин, Э. А. Кнышев и др. Сб. «Металлотермия». № 1, «Металлургия», 1964.
3. А. С. Дубровин, С. С. Шестаков и др. Сб. «Металлотермия», № 2, «Металлургия», 1965.
4. Ю. Л. Плинер, А. С. Дубровин. ЖПХ, 1964, XXXVII.
5. Н. Н. Мурач, У. Д. Верягин. Внепечная металлургия. Металлургиздат, 1956.
6. А. А. Шидловский. Основы пиротехники. «Машиностроение», 1964.
7. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.—Л., Энергоиздат, 1957.
8. С. Е. Андреев, В. В. Товаров, В. А. Перов. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. Металлургиздат, 1959.



9. А. С. Дубровин, В. Л. Кузнецов. Изв. АН СССР, Металлы, 1965, 4.
10. А. Ф. Чудновский. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.
11. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 1, 4.
12. И. М. Рафалович. Определение теплофизических свойств материалов цветной металлургии. Металлургиздат, 1957.
13. А. Г. Харламов. ИФЖ, 1965, IX, 1.
14. В. М. Костылев, В. Г. Набатов. ИФЖ, 1965, IX, 3.
15. В. М. Костылев. Теплофизика высоких температур, 1964, 2, 1.
16. Ю. Л. Плинер, С. И. Сучильников, Е. А. Рубинштейн. Аллюминотермическое производство ферросплавов и лигатур. Металлургиздат, 1963.
17. Н. Н. Бахман, В. С. Никифоров. ЖФХ, 1964, XXXVIII, 1.
18. А. С. Дубровин, Л. Н. Русаков, Ю. Л. Плинер. Изв. АН СССР, Металлургия и горное дело, 1964, 2.

УДК 536.463+662.311.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЯЩИХ ТРЕЩИН В ПОРОХЕ

*З. В. Кирсанова, О. И. Лейпунский*

(Москва)

В предлагаемой работе рассматривается устойчивость трещины в случае, когда растягивающие трещину нагрузки задаются избыточным давлением внутри нее, происходящим, например, от потока газа продуктов сгорания, вытекающего из трещины. Такой случай может быть при горении трещины в порохе. Повышенное давление, выталкивающее газ из трещины, может привести к разрыву и дальнейшему распространению трещины. Определена область размеров трещин, сохраняющих устойчивость при горении внутренней поверхности. Найдена критическая скорость распространения трещины. Распространение с меньшей скоростью приводит к автостабилизации трещины. При изложении результатов предполагается, что горение и растяжение трещины не меняет свойств материала.

Определены границы области устойчивости и условия автостабилизации при наличии растягивающих напряжений в материале.

### УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЯЩЕЙ ОТКРЫТОЙ ТРЕЩИНЫ

Наличие открытой трещины в толще пороха и проникновение горения в нее может привести к повышению давления внутри трещины. Повышенное давление обеспечивает течение продуктов сгорания из трещины наружу и одновременно расширяет ее. Как показали эксперименты на искусственных щелях, образованных внутренними поверхностями двух пластин пороха, внутри щели при горении может образоваться весьма высокое давление [1]. При достаточно большом давлении прочность пороха может оказаться недостаточной, что приведет к разрыву материала, увеличению длины трещины горячей поверхности и скорости выделения газов, а также к увеличению избыточного давления и дальнейшему росту трещины. Это можно назвать неустойчивостью тре-