

сложного механизма протекания процесса кристаллизации в рассмотренном примере является дефицитный по кислороду состав окисного расплава. При приближении состава жидкой фазы Al—O к стехиометрическому все описанные особенности исчезают и процессы кристаллизации идут независимо друг от друга.

В заключение можно сделать следующие выводы. Проведенный термодинамический анализ характеристик положения равновесия в системе Cr—Al—C—O показал, что для формирования качественной структуры материала наплавки имеет существенное значение состав каждой из сосуществующих жидких фаз. Недостаток содержания в системе кислорода может привести к усложнению механизма протекания кристаллизации в системе и ухудшить качество наплавки. Параметрами процесса, наиболее эффективно влияющими на распределение химических элементов между различными жидкими фазами, являются состав шихты и давление CO.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: двадцать лет поисков и находок /АН СССР. ИСМАН.— Препр.— Черноголовка, 1989.
2. Юхвид В. Ю. Процессы горения и фазоразделения в СВС-металлургии // Там же.
3. Ивлева Т. П., Шкадинский К. Г., Юхвид В. И. Гравитационное фазоразделение и теплообмен в системе высокотемпературный расплав — металлическая основа // Там же.— 1988.
4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко.— М.: Наука, 1979.
5. Stull D. R., Prophet H. JANAF Thermochemical Tables.— Washington: Government Printing Office, 1971.
6. Chase M. W. et al. // Ibid.— 1974. Suppl. // J. Phys. Chem. Ref. Data.— 1974.— N 3.— P. 311.
7. Chase M. W. et al. // Ibid.— 1975.— N 4.— P. 1.
8. Chase M. W. et al. // Ibid.— 1978.— N 7.— P. 793.
9. Chase M. W. et al. // Ibid.— 1982.— N 11.— P. 695.
10. Ширяев А. А., Тараканов А. Ю., Нерсисян М. Д. Равновесие фаз в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // Сверхпроводимость: физика, химия, техника.— 1990.— 3, № 3.— С. 498.
11. Фромм Е., Гебхарт Е. Газы и углерод в металлах/Пер. с нем.— М.: Metallургия, 1980.
12. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов.— М.: Мир, 1974.
13. Киффер Р., Бензювский Ф. Твердые материалы.— М.: Metallургия, 1968.

г. Москва

Поступила в редакцию 5/VI 1990

УДК 536.46

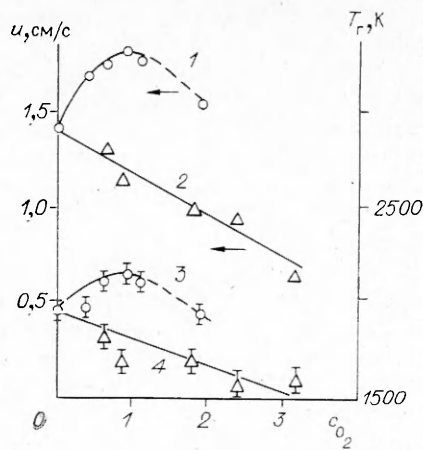
С. Б. Бабкин, В. Н.Bloшенко, И. П. Боровинская

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ГОРЕНИИ СВС-СИСТЕМЫ Mo + V

Изучено влияние примесей MoO_3 и V_2O_5 на скорость горения смеси Mo + V. Показано, что MoO_3 увеличивает скорость горения, V_2O_5 — уменьшает. На основании теоретических оценок и анализа экспериментального материала сделан вывод, что при горении смеси Mo + V транспорт реагентов осуществляется в основном через газовую фазу в виде MoO_3 . Найдена связь между скоростью горения и содержанием примесного кислорода в смеси Mo + V.

В работе [1] показано, что скорость горения системы Mo + V может быть существенно изменена за счет введения в исходную шихту небольших количеств различных газифицирующихся добавок, которые интенсифицируют массоперенос реагентов путем создания дополнительного

Рис. 1. Зависимости $u(c_{O_2})$ и $T_r(c_{O_2})$: MoO₃ (1, 3) и B₂O₃ (2, 4).



канала переноса через газовую фазу. Дальнейший анализ результатов [1] наводит на мысль о том, что основными газофазными переносчиками при горении состава Mo + B являются в первую очередь сильнолетучий окисел MoO₃ и в значительно меньшей мере B₂O₃, а действие использованных в [1] добавок фактически сводится к изменению концентрации этих окислов. Если согласиться с такой трактовкой, то становится очевидным, что существуют два пути изменения концентрации летучих окислов: введение в исходную шихту газифицирующихся добавок (аналогично [1]) либо этих же окислов.

Опыты состояли в следующем. В исходную шихту вводили MoO₃ и B₂O₃ с массовым содержанием до 6%. Для сохранения соотношений Mo и B одновременно с окислами в исходную шихту добавляли необходимые количества чистых элементов. Таким образом, в смеси изменялось только содержание кислорода. Горение изучалось на образцах диаметром 10 и высотой 15—20 мм. Перед сжиганием образцы подвергались 2 ч предварительной термовакуумной обработке при температуре $T = 573$ К и величине вакуума $1,32 \cdot 10^{-2}$ Па. Такой режим отжига не приводил к образованию конечного продукта MoB и сохранял исходное количество кислорода в шихте [2]. Для всех образцов начальная температура составляла 573 ± 10 К и измерялась термопарой, помещенной в центре печи (как и образец). Горение проходило по обычной для процессов СВС схеме в атмосфере аргона при давлении 1 атм. Скорость горения измерялась по временной разности сигналов от двух термопар, касающихся образца на заданном расстоянии друг от друга. При помощи этих же термопар измерялась температура горения. Сигналы регистрировались на запоминающем осциллографе. Для каждого содержания летучего окисла проводили по три опыта. Ошибка в измерении скорости составила 3%, в измерении температуры горения $+50$ К. Последняя обусловлена разной степенью касания образца термопарами.

На рис. 1 представлена типичная зависимость скорости u и температуры горения T_r от содержания кислорода c_{O_2} , добавленного в виде окислов. Видно, что с увеличением концентрации MoO₃ величина u растет, а при добавлении B₂O₃ монотонно падает. При введении MoO₃ в количествах более 1% в пересчете на массу кислорода горение сопровождается разрушением образцов. При содержании MoO₃, равном 5,77%, что в пересчете на массу кислорода составляет 1,92%, образцы при горении распадаются на тонкие диски толщиной 0,5—1,0 мм.

Введение MoO₃ в шихту может привести к реакции этой окиси с бором с образованием борпдов молибдена и окиси бора. Как известно [3], такие реакции сопровождаются большим тепловыделением, а адиабатическая температура горения смеси MoO₃ + B достигает 3000 К (в случае, когда B₂O₃ образуется в к-фазе). Это могло бы привести к дополнительному тепловыделению при горении системы Mo + B с добавками MoO₃ и, следовательно, к увеличению скорости горения смеси Mo + B. Однако, как показано в [2], в подобных условиях проведения опытов практически весь кислород удаляется из системы. Поэтому для учета влияния теплового эффекта реакции между MoO₃ и B надо принять во внимание испарение B₂O₃. Оценки, проведенные аналогично [3], показывают, что тепловые эффекты остаются высокими по сравнению с теп-

ловыми эффектами реакции молибдена с бором, но адиабатические температуры горения смеси MoO_3 и В лежат в пределах 1300—1800 К (независимо от того, какие образуются бориды). Таким образом, реакции типа $\text{MoO}_3 + \text{B} \rightarrow \text{Mo}_n\text{B}_m + \text{B}_2\text{O}_3$ (газ) не должны приводить к дополнительному подогреву при горении $\text{Mo} + \text{B}$, для которой $T_{\text{ад}} = 1800$ К, и тем самым увеличивать скорость горения.

Увеличение u при введении в шихту MoO_3 можно объяснить только участием окиси в массопереносе через газовую фазу. Снижение скорости при введении B_2O_3 связано, по всей видимости, с тем, что летучесть этого окисла мала и B_2O_3 фактически инертная в тепловом отношении добавка, понижающая температуру горения. Для сравнения укажем: давление насыщенных паров B_2O_3 при $T = 2000$ К (наиболее типичная температура при горении системы $\text{Mo} + \text{B}$) составляет $1,32 \cdot 10^{-2}$ Па, а для MoO_3 при этой же температуре $^1 > 1$ атм. Таким образом, MoO_3 действует так же, как кислородвыделяющие добавки (KClO_4 , NaNO_3 , KMnO_4 и др. [1]), которые разлагаясь в волне горения, выделяют кислород.

Для анализа полученных результатов рассмотрим простейшую модель газофазного переноса, основные компоненты которого — MoO_3 и пары молибдена и бора. Оценим вначале вклад процессов прямого испарения элементов.

Допустим, что частица шихты сферическая, массой M и радиусом r_0 . Скорость испарения с ее поверхности, необходимую для поддержания горения, находим из выражения

$$W = - \frac{1}{S} \frac{dM}{dt}.$$

Здесь S — площадь поверхности частицы, зависящая от времени: $dM = S \rho dr$. Отсюда $W = -\rho dr/dt$ и $W = \rho r_0/\tau = \rho r_0 u/l$; $\tau = l/u$ — время пребывания частицы в зоне прогрева; l — ширина зоны прогрева; ρ — плотность частицы. Типичные значения входящих сюда параметров: $u = 0,5 \div 1$ см/с, $\rho_{\text{B}} = 2,3$ г/см³, $\rho_{\text{Mo}} = 10,2$ г/см³, $l = 10^{-2} \div 10^{-1}$ см, $r_0 = 10^{-5} \div 10^{-3}$ см. Тогда необходимая для горения скорость испарения $W(\text{Mo}) \geq 5 \cdot 10^{-4}$ и $W(\text{B}) \geq 1,2 \cdot 10^{-4}$ г/(см² · с). Реальную скорость испарения оценим, исходя из формулы Герца — Кнудсена

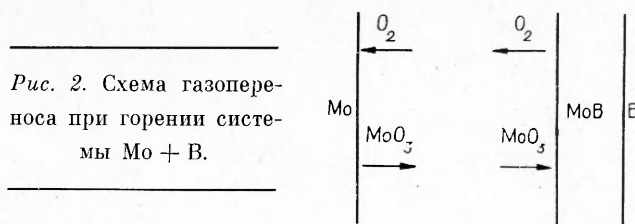
$$W = p (\mu/2\pi RT)^{1/2}$$

(p — давление насыщенного пара; μ — молекулярная масса; R — газовая постоянная). При $T = 2000$ К $W(\text{Mo}) \approx 4 \cdot 10^{-7}$ и $W(\text{B}) \approx 3 \cdot 10^{-8}$ г/(см² · с). Таким образом, реальная скорость испарения на 3—4 порядка ниже необходимой, поэтому горение системы за счет прямого испарения сферических частиц шихты невозможно.

Форма реальных частиц, составляющих шихту, далека от сферической. Они имеют сильно развитую поверхность с острыми выступами, на которых из-за малого радиуса кривизны можно ожидать высокой скорости испарения: $W = W_0 \exp(2\sigma\mu/RT r_1)$, где W_0 — скорость испарения с плоской поверхности; r_1 — радиус кривизны острых выступов; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Характерный размер $r_* = 2\sigma\mu/RT$, ниже которого начинает играть роль кривизна поверхности, составляет для молибдена — 20 Å, для бора — 6 Å (при $T = 2000$ К). Из приведенных оценок следует, что для горения системы за счет прямого испарения элементов кривизна должна обеспечить рост скорости испарения для Мо на 3 порядка, для бора на 4 порядка. Необходимые для этого радиусы кривизны острых выступов должны быть для молибдена < 3 Å, для бора < 1 Å.

Представим теперь реальную частицу как сферическую, на поверхности которой расположены конусы с радиусом основания r и высотой

¹ Поскольку опыты проводились при внешнем давлении аргона 1 атм, то такое большое давление паров MoO_3 привело к разрушению образцов. Поэтому штриховые кривые на рис. 1 представляют лишь некоторые средние значения для пульсирующего горения.



h (модель булавки). Объем одного конуса равен $(\pi/3) \cdot r^3 \operatorname{tg} \alpha$ (α — угол в основании конуса, причем $\cos \alpha = S_1/S_2$; S_1 — площадь поверхности частицы в предположении, что она сферическая; S_2 — реальная площадь поверхности частицы). Объем всех конусов, покрывающих частицу

$$V = \frac{\pi}{3} r^3 (S_2^2/S_1^2 - 1)^{1/2} N, \quad (1)$$

$N = 4r_0^2/r^2$ — число конусов. Доля объема, приходящаяся на эти конусы, может быть представлена в виде

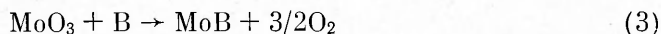
$$\eta = V/V_0 = r/r_0 (S_2^2/S_1^2 - 1)^{1/2}, \quad (2)$$

где V_0 — объем сферической частицы радиуса r_0 . Если в выражение (2) подставить размер частиц r_0 и приведенные выше необходимые радиусы кривизны r_1 , то, зная S_1 и S_2 , можно определить, какую долю объема частицы занимают конусы. Обычно поверхность реальной частицы отличается от поверхности сферической такого же размера на порядок. Тогда из (2) для частиц Mo и B размером ~ 1 мкм получаем $\eta \approx 10^{-3}$. Таким образом, даже учет сильно разветвленной поверхности реальной частицы не позволяет обеспечить необходимую скорость испарения. Другими словами, благодаря интенсивному испарению с острых выступов частица быстро превращается в сферическую и дальнейшее ее испарение не в состоянии обеспечить скорость горения. Поэтому массоперенос через газовую фазу в виде паров простых элементов при горении системы Mo + B следует признать нереальным.

Рассмотрим скорость испарения окислов. На основании формулы Герца — Кнудсена скорость испарения B_2O_3 при $T = 2000$ К составляет $\sim 10^{-1}$ г/(см² · с), а $MoO_3 \sim 10$ г/(см² · с) (при $T_{\text{кип}} = 1530$ К). Эти величины на несколько порядков превышают необходимую скорость испарения, и если при газопереносе кислород многократно участвует в транспорте реагентов, то уже незначительных количеств примесных окислов (доли процента) достаточно для обеспечения горения системы. Исходя из этого, попытаемся найти конкретную связь между скоростью горения и содержанием примесного кислорода, входящего в состав окислов. В основу рассматриваемой простейшей модели положим следующие допущения (рис. 2).

1. Транспорт реагентов осуществляется только за счет газопереноса и в основном за счет переноса молибдена к бору в виде MoO_3 . Это предположение основано на том, что скорость испарения MoO_3 на несколько порядков превышает скорость испарения B_2O_3 . Обратно, от частицы бора к частице молибдена, переносится свободный кислород.

2. Реакция



идет на поверхности бора и не ограничена диффузией реагентов через слой продуктов MoB , т. е. принимается, что продукт представляет собой чрезвычайно пористое соединение. Кроме того, десорбция кислорода с поверхности частиц бора происходит мгновенно и бор не окисляется.

3. На поверхности частиц Mo протекает реакция



все элементарные стадии которой не являются лимитирующими.

В соответствии с принятыми допущениями выражение для скорости образования трехокси молибдена на поверхности молибдена и скорости поглощения кислорода запишем в следующем виде:

$$W^+(\text{MoO}_3) = -\frac{2}{3} W^-(\text{O}_2) = K(\text{O}_2) \theta^{3/2}, \quad (5)$$

где $K(\text{O}_2)$ — константа реакции кислорода с молибденом; θ — степень заполнения кислородом поверхности молибдена. При установлении адсорбционного равновесия $\theta = K(\text{Mo}, \text{O}_2) p_{\text{O}_2}$, где $K(\text{Mo}, \text{O}_2)$ — константа адсорбционного равновесия кислорода на поверхности молибдена; p_{O_2} — давление кислорода. Тогда

$$W^+(\text{MoO}_3) = -\frac{2}{3} W^-(\text{O}_2) K K(\text{O}_2) K(\text{Mo}, \text{O}_2)^{3/2} p_{\text{O}_2}^{3/2}. \quad (6)$$

Проводя аналогичные рассуждения для реакции (3), находим

$$-W^-(\text{MoO}_3) = W^+(\text{MoB}) = \frac{2}{3} W^+(\text{O}_2) = K(\text{MoB}) K(\text{B}, \text{MoO}_3) p_{\text{MoO}_3}. \quad (7)$$

Здесь $K(\text{MoB})$ — константа скорости реакции MoO_3 с бором; $K(\text{B}, \text{MoO}_3)$ — константа равновесия MoO_3 на поверхности частиц бора; p_{MoO_3} — давление паров². В приближении квазистационарного равновесия скорости образования и расхода кислорода и окиси молибдена попарно равны между собой, т. е.

$$-W^-(\text{O}_2) = W^+(\text{O}_2), \quad W^+(\text{MoO}_3) = -W^-(\text{MoO}_3).$$

Отсюда находим

$$p_{\text{MoO}_3} = \frac{K(\text{O}_2) K(\text{Mo}, \text{O}_2)^{3/2}}{K(\text{MoB}) K(\text{B}, \text{MoO}_3)} \bar{r}_{\text{O}_2}^{3/2} - \gamma \bar{r}_{\text{O}_2}^{3/2}. \quad (8)$$

На основании (7), (8) получаем еще одно выражение

$$W^+(\text{MoB}) = K(\text{O}_2) K(\text{Mo}, \text{O}_2)^{3/2} p_{\text{O}_2}^{3/2}.$$

Таким образом, скорость образования продукта MoB пропорциональна давлению паров трехокси молибдена или давлению кислорода в степени $3/2$. На опыте, однако, давление внутри горящего образца не поддается прямому измерению. Поэтому для обработки экспериментальных данных необходимо связать $W^+(\text{MoB})$ с количеством находящегося в шихте кислорода (как в виде исходных примесных окислов, так и в виде вводимых добавок MoO_3 и соединений, использованных в [1]).

Пусть в шихте массой $M_{\text{ш}}$ находится кислород в количестве M_{O_2} . При горении он распределяется по следующим состояниям: часть находится в свободном газообразном состоянии, часть войдет в состав MoO_3 в паровой фазе, другая часть — в адсорбированном состоянии на поверхности B и Mo в виде O_2 или MoO_3 . При высоких температурах долей кислорода и MoO_3 в адсорбированном состоянии можно пренебречь по сравнению с долей в газовой фазе. В этом случае с учетом (8) получаем связь между полным количеством кислорода и парциальным давлением MoO_3 :

$$M_{\text{O}_2} = \frac{3M_{\text{ш}} m_{\text{O}_2}}{2RT\rho_1} \left(1 + \frac{2}{3} \gamma^{-2/3} p_{\text{MoO}_3}^{-1/3} \right) p_{\text{MoO}_3}. \quad (9)$$

Здесь m , ρ_1 — пористость и плотность образца.

Согласно общим представлениям теории горения, связь между скоростью горения и скоростью химической реакции образования конечно-

² При записи уравнений (6), (7) оставался только начальный участок изотерм адсорбции, т. е. считалось, что скорости пропорциональны соответствующим давлениям. Это связано с тем, что в условиях опыта плотность частиц в газовой фазе не превышает 10^{19} см^{-3} .

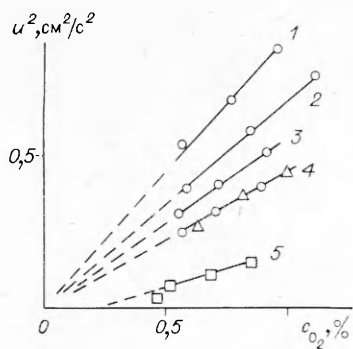


Рис. 3. Зависимость скорости горения системы Мо + В от массового содержания кислорода в шихте, включающей исходный кислород и добавленный в виде $KClO_4$ (1), $NaNO_3$ (2), $KMnO_4$ (3), $KClO_3$ (4, 5).
 ○ — отмытый; △ — неотмытый аморфный бор; □ — кристаллический бор.

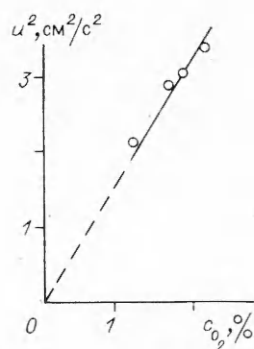


Рис. 4. Зависимость скорости горения системы Мо + В от общего содержания кислорода, включающего исходный O_2 и добавленный в виде MoO_3 .

го продукта $W^+(MoB)$ можно представить в виде $u^2 = CW^+(MoB)$ (C — несущественный для наших целей множитель). Используя (7), получаем

$$u^2 = CK (MoB) K (B, MoO_3) p_{MoO_3}. \quad (10)$$

Учитывая (9), найдем аналогичную связь между скоростью горения и концентрацией находящегося в шихте кислорода $c_{O_2} = M_{O_2}/M_{ш}$:

$$u^2 = \bar{C} \frac{2K (MoB) K (MoO_3, B) R T p_1}{3\mu_{O_2} m \left(1 + \frac{2}{3} \gamma^{-2/3} p_{MoO_3}^{-1/3}\right)} c_{O_2}. \quad (11)$$

Чтобы на основании (11) обработать экспериментальные данные, надо найти величину $\frac{2}{3} \gamma^{-2/3} p_{MoO_3}^{-1/3}$. Такие оценки, основанные на анализе доступных значений параметров и экспериментальных результатов, показывают, что во всяком случае этот параметр может иметь значение лишь при $u \leq 0,2 - 0,3$ см/с в условиях опытов работы [1] и при $u \leq 0,1$ см/с в данных условиях. Другими словами, для реальных скоростей горения системы Мо + В параметром $\left(\frac{2}{3} \gamma^{-2/3} p_{MoO_3}^{-1/3}\right)$ можно пренебречь. Таким образом, как экспериментальные данные [1], так и настоящие должны спрямляться в координатах u^2, c_{O_2} .

На рис. 3 приведены результаты такого спрямления экспериментальных данных [1], причем при определении содержания кислорода в шихте учитывался весь кислород, как введенный в виде кислородвыделяющих солей, так и исходный, который содержался на частицах Мо и В в виде окислов. Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно ложатся на прямые в указанных координатах. Следует отметить, что примесный кислород может находиться не только в виде окислов Мо и В, но и в виде различных соединений, в том числе инертных и нелетучих в условиях горения. Другими словами, не весь кислород может участвовать в газопереносе. С этой точки зрения интересно проанализировать рис. 3.

Наибольшая скорость горения должна быть при добавлении тех солей, которые имеют температуру разложения, близкую к температуре горения. В этом случае максимальное выделение кислорода из соли происходит вблизи зоны горения, и поэтому коэффициент его участия в газопереносе максимальный. На рис. 4 к таким солям относятся $KClO_4$ и $NaNO_3$ ($T_{разл} \approx 870$ К). У $KClO_3$ температура разложения (670 К)

более низкая, кислород выделяется раньше и большая часть его уходит из образца еще до подхода зоны горения. Температура полного разложения KMnO_4 до свободного кислорода значительно выше, чем температура горения, поэтому в зоне горения выделяется только часть кислорода, в связи с чем скорость горения при введении в шихту последних двух солей ниже, чем при введении KClO_4 и NaNO_3 . На рис. 4 представлены результаты спрямления при введении в шихту кислорода в составе окисла молибдена (по данным рис. 1), причем учтено исходное содержание кислорода, составляющее по результатам анализа 1,2 %.

При обсуждении экспериментального материала необходимо отметить следующий факт. Если прямые на рис. 4 экстраполировать в область нулевых значений концентраций кислорода, то с точностью, доступной на опыте, они уходят в начало координат. Отсюда можно сделать предположение, что без примесного O_2 система $\text{Mo} + \text{B}$ гореть не будет. Однако механизм участия примесного кислорода в горении $\text{Mo} + \text{B}$ до конца не ясен и, возможно, при отсутствии примесного O_2 выступят на первый план другие факторы, обеспечивающие горение системы с какой-то минимальной скоростью. Это можно было бы проверить, исследовав горение шихты, очищенной от окислов. Такая попытка сделана, но, к сожалению, пока не удалось заметно снизить содержание кислорода в исходной шихте.

В заключение отметим, что на основании теоретических оценок и анализа экспериментального материала можно сделать вывод, что при горении системы $\text{Mo} + \text{B}$ кислород участвует в транспорте реагентов через газовую фазу (главным образом в виде MoO_3), и это — основной путь транспорта реагентов. Причем не имеет значения, каким образом увеличена концентрация MoO_3 : за счет введения в шихту кислородвыделяющих солей [1] либо непосредственно окисла MoO_3 . Предложенный механизм газофазного транспорта реагентов при горении системы $\text{Mo} + \text{B}$ дает теоретические результаты, находящиеся в качественном согласии с экспериментом (спрямление в координатах u^2 , c_{O_2}).

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровинская И. П., Новиков Н. П., Болдырев В. В. Горение смеси молибдена и бора в присутствии активных добавок // ФГВ.— 1977.— 13, № 3.— С. 342.
2. Блошенко В. Н., Бокий В. А. и др. Изменение состояния примесного кислорода и взаимодействие компонентов при вакуумном отжиге смеси порошков молибдена и бора // ФГВ.— 1988.— 24, № 2.— С. 111.
3. Новиков Н. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Процессы горения в химической технологии и металлургии/Под ред. А. Г. Мержанова.— Черноголовка, 1975.

п. Чернооголовка

*Поступила в редакцию 6/IV 1990,
после доработки — 28/VIII 1990*

УДК 662.215.5

Э. А. Петров, Л. Т. Еременко

ВЛИЯНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ БРИЗАНТНЫХ ВВ НА ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Рассмотрен и комплексным исследованием ряда физико-химических свойств вещества FeFO подтвержден механизм снижения чувствительности этого вещества за счет невалентных связей.

В работе [1] показана достаточно тесная связь между чувствительностью ВВ по экспериментальному критерию H_{50} (высота 50%-ной частоты отказов при копровой пробе) и некоторой расчетной термоди-