

19. Ткачев С. П. Рентгенографический метод исследования тетрагональных мартенситных структур//АМРА. Л.: Машиностроение, 1988. Вып. 38. С. 84—90.
20. Хейкер Д. М., Зевин Л. С. Рентгеновская дифрактометрия. М.: Наука, 1963. 380 с.
21. Евграфов А. А., Левин В. А., Липницкая И. М. О подходе к задаче разделения  $K_2$ -дублета//АМРА. Л.: Машиностроение, 1984. Вып. 32. С. 41—50.
22. Либерман Б. Д., Пановко В. М., Шелест А. Е. Об учете дублетного размытия рентгеновских лучей при анализе структуры кристаллов//Зав. лаб. 1980. 46. № 2. С. 141—142.
23. Delhez R., Mittemeijer E. I. An Analysis of Errors in the Fourier Coefficients of the  $\alpha_1$  Line Profile//J. Appl. Cryst. 1975. V. 8. P. 612—614.
24. Ladell I., Zagojsey A., Peariman S. Cu  $K_{\alpha_2}$  Elimination Algorithm//J. Appl. Cryst. 1975. V. 8. P. 499—506.
25. Mignot I., Rondot D. Application du Lissage de Raies de Diffraction des Rayons x a la Separation du Doublet  $K_{\alpha_1}$ ,  $K_{\alpha_2}$ //J. Appl. Cryst. 1976. V. 9. P. 460—465.
26. Тихонов А. Н., Арсенин В. А. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
27. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. М.: Сов. радио, 1976. 192 с.
28. Куколь В. В. Определение положения максимума  $K_{\alpha_1}$ -компонента дублета по профилю уширенной дублетной дифракционной линии//Зав. лаб. 1965. Т. 31. № 6. С. 706—708.
29. Мороз И. А., Бурковская Л. Л., Иноземцев О. И. Аналитическое представление компонент рентгеновских интерференционных линий//Зав. лаб. 1981. Т. 47. № 10. С. 19—21.
30. Фильчаков П. Ф. Численные и графические методы прикладной математики. Киев: Наукова думка, 1970. 800 с.
31. Серебренников М. Г. Гармонический анализ. М.-Л.: Гостехиздат, 1948. 504 с.
32. Вишняков Я. Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов. М.: Металлургия, 1975. 479 с.
33. Штремель М. А., Капуткина Л. М. Определение компонент мультиплетной линии//Кристаллография. 1970. Т. 15. Вып. 3. С. 443—451.
34. Белозеров В. В., Тананко И. А., Махатилова А. И. Определение содержания углерода в мартенсите закаленной и отпущенной стали//Зав. лаб. 1980. Т. 46. № 10. С. 909—911.
35. Бекренев А. Н., Терминасов Ю. С., Ткачев С. П. К определению степени тетрагональности кристаллической решетки мартенсита//Физика прочности, пластичности металлов и электродинамических явлений в ферритах. Куйбышев, 1976. Вып. 3. С. 6—10.
36. Ткачев С. П. Разделение тетрагонального дублета рентгеновской дифракционной линии//Физика прочности, пластичности металлов и электродинамические явления в веществе. Куйбышев, 1977. Вып. 5. С. 106—108.

УДК 621.762:621.45.034

**А. Н. БЕКРЕНЕВ, В. В. ЛЕНИВКИН, Г. И. ГОРЕЛОВ**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕССУЕМОСТИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ «БОР—МАГНИЙ» И ОПТИМИЗАЦИЯ ИХ СОСТАВА**

*Рассматривается задача прогнозирования удельных энергетических характеристик топливных брикетов, получаемых прессованием смесей порошков бора и магния различной дисперсности при различном содержании компонентов с использованием индивидуальных зависимостей прессуемости. Проведен элементарный теоретический анализ зависимости объемной теплотворной способности смесей от массовой доли компонентов для различных усилий прессования, показано качественное совпадение теоретических зависимостей с экспериментальными результатами. Из анализа экспериментальных результатов сделан вывод о том, что брикеты, получаемые прессованием при 300—600 МПа смесей, содержащих 10—30% мас. магния, могут быть рекомендованы как оптимальные по объемным энергетическим характеристикам.*

Высокая удельная теплотворная способность бора определяет значительный интерес, который проявляется к этому элементу как потенциальному высокоэффективному компоненту твердых топлив для

энергетических установок различного назначения. Проблемы повышения эксплуатационных характеристик перспективных энергоустановок в значительной мере зависят от выбора топлива, его удельных энергетических характеристик, особенностей горения и характеристик продуктов сгорания, стабильности топлива при хранении и от целого ряда других параметров [1]. Поэтому задача прогнозирования и оптимизации энергетических характеристик твердых топлив, содержащих бор и другие высокоэнергетические компоненты, является актуальной в связи с разработкой перспективных энергоустановок.

Прессованием пластичных высокоэнергетических металлов, например, магния или алюминия, сравнительно легко могут быть получены топливные заряды с объемным содержанием металла до 70—80% и с приемлемыми для эксплуатации прочностными характеристиками. Например, при усилии прессования  $P_{уд.} = 600$  МПа возможно получить из диспергированного алюминия монолитный металл [2]. Однако прессование таких порошковых компонентов, как бор или цирконий (бор имеет высокую теоретическую удельную теплотворную способность, а цирконий обеспечивает высокую температуру продуктов сгорания), существенно осложняется высокой твердостью частиц этих материалов.

В данной работе рассматривается методика расчета удельных энергетических характеристик композиций на примере смесей порошков бора и магния с использованием минимального количества эмпирических коэффициентов — индивидуальных характеристик прессуемости компонентов смеси и их индивидуальных теплот сгорания при использовании кислорода в качестве окислителя.

Описание характеристик плотноупакованных порошковых смесей с помощью минимального набора эмпирических констант [3], использованное, например, для определения теплофизических характеристик образцов, полученных прессованием смесей порошков различных металлов с отличающимися теплофизическими характеристиками [4], показало достаточную надежность и точность метода. Такой подход позволяет с удовлетворительной точностью прогнозировать теплопроводность прессованных порошковых композиций по данным о прессуемости отдельных компонентов смеси и по значениям коэффициентов теплопроводности монолитных образцов в интервале удельных давлений до 200 МПа.

На рис. 1 приведены кривые прессуемости для смесей порошков различных металлов в зависимости от состава и усилия прессования, взятые из работы [4], из которых наглядно видно, что даже при сравнительно небольших усилиях прессования ( $P_{уд.} < 200$  МПа)

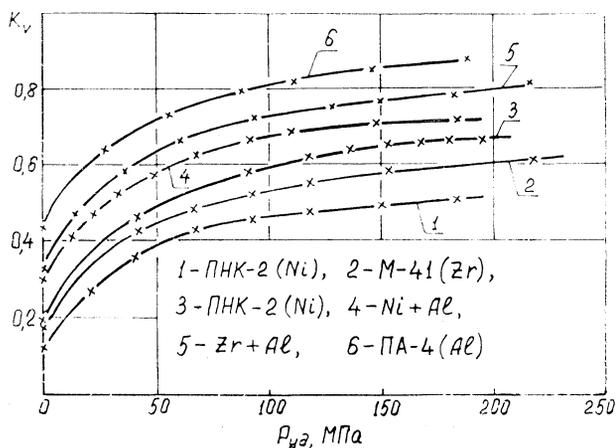


Рис. 1. Кривые прессуемости смесей порошков различных материалов [4]

образцы из пластичного алюминия имеют достаточно высокую объемную плотность, составляющую 90% от плотности монолитного металла, в то время как образцы из циркониевого порошка не обеспечивают практически приемлемых значений плотности.

Экспериментальная проверка прессуемости порошков магния, бора и их смесей при различных усилиях прессования в более широком интервале величин удельного давления, чем в работе [4], показала, что даже при весьма значительных усилиях прессования объемное содержание частиц бора в брикете не превосходит 52%, в то время как для магния и алюминия этот показатель приближается к 100%. Кроме того, простейшие сравнения прочностных характеристик получаемых брикетов показали, что механическая прочность брикетов из чистого бора значительно ниже прочности брикетов из магния или алюминия.

Логично предположить, что недостатки порошкового бора, фактически не позволяющие использовать его как горючее для металлотопливных энергосиловых установок, в значительной мере можно нейтрализовать применением смесей энергоемкого, но плохо прессуемого порошкового бора с менее энергоемкими, но высокопластичными металлами, например, магнием или алюминием. Использование таких смесей позволяет компенсировать сразу несколько эксплуатационных недостатков, свойственных топливным зарядам из чистого порошкового бора. Во-первых, заполнение пустот между частицами твердого бора частицами пластичного металла, пусть даже с меньшей теплотворной способностью, позволит существенно повысить эффективную теплотворную способность получаемых комбинированных зарядов. Например, теоретически удельная теплотворная способность брикета, содержащего 52% бора и 48% алюминия, в 1,6 раза выше удельной теплотворной способности брикета из чистого бора, содержащего всего 52% бора, а для комбинированного брикета, содержащего 52% бора и 48% магния, удельная теплотворная способность в 1,3 раза превосходит удельную литровую теплотворную способность реального брикета из порошкового бора. Во-вторых, поскольку объемное содержание высокопластичных металлов в боросодержащих смесях может быть значительным (до 48%), то при больших усилиях прессования предоставляется возможность получить прочный силовой каркас из частиц пластичного металла, повышая тем самым механическую прочность зарядов после прессования. В-третьих, заряды из смеси порошков бора и алюминия, а особенно из смеси порошков бора и магния, должны быть менее требовательными к температурным условиям в огневой зоне камеры сгорания за счет того, что частицы алюминия и магния надежно воспламеняются при существенно более низкой температуре, чем частицы бора. В частности, температура, необходимая для воспламенения газозвеси частиц бора и магния, незначительно выше температуры воспламенения частиц чистого магния, поскольку воспламенение частиц бора при такой схеме сжигания обеспечивается за счет высокой температуры горения магния с незначительным увеличением времени задержки воспламенения [5]. По эксплуатационным удельным энергетическим характеристикам смеси порошков бора и магния предпочтительнее смесей порошков бора и алюминия, поскольку температура воспламенения алюминия выше температуры воспламенения магния, а разница в удельных энергетических характеристиках смесей незначительна.

## Элементарная модель комбинированного смесевго твердотопливного заряда

Рассмотрим теоретически процесс прессования комбинированного твердотопливного заряда из смеси твердых и высокопластичных компонентов, используя экспериментальную зависимость (рис. 2) плотности каждого из дисперсных компонентов от усилия прессования на примере прессования порошковых смесей бора и магния и принимая в качестве основного допущения, что частицы бора по сравнению с частицами магния обладают существенно большей твердостью [5] и существенно меньшим размером. Рассмотрим некоторые идеализированные случаи процесса прессования смесевго заряда.

1. Рассмотрим ситуацию, когда масса бора существенно больше массы магния. Учитывая соотношение размеров частиц для малых усилий прессования, можно считать, что пластической деформации частиц магния не происходит, и порошковый бор прессуется так, как если бы он находился на монокристаллической прокладке из магния. В этом случае объем брикета будет описываться формулой

$$V_{\text{брик}} = V_{\text{мон}}(\text{Mg}) + V_{\text{эфф}}(\text{B}) = \frac{M(\text{Mg})}{\rho_{\text{мон}}(\text{Mg})} + \frac{M(\text{B})}{\rho^{\text{P}}_{\text{эфф}}(\text{B})}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{мон}}(\text{Mg})$  — плотность магния в монолите;  $\rho^{\text{P}}_{\text{эфф}}(\text{B})$  — плотность брикета из чистого бора при усилии прессования, равном  $P$  Па (берется из эксперимента по прессованию индивидуальных порошковых материалов).

При увеличении усилия прессования начинается пластическая деформация частиц магния, и магний начинает заполнять межгранульные промежутки между частицами бора. При больших усилиях прессования можно считать, что весь магний сосредоточен в межгранульных промежутках, и объем брикета можно будет вычислить по формуле

$$V_{\text{бр}} = V_{\text{эфф}}(\text{B}) = M(\text{B})/\rho^{\text{P}}_{\text{эфф}}(\text{B}). \quad (2)$$

Возможно также представить себе ситуацию, что частицы бора и магния прессуются независимо друг от друга, например, когда деформация частиц магния достаточна только для проникновения к внешним границам конгломератов из большого количества частиц бора. В этом случае

$$V_{\text{бр}} = \frac{M(\text{Mg})}{\rho^{\text{P}}_{\text{эфф}}(\text{Mg})} + \frac{M(\text{B})}{\rho^{\text{P}}_{\text{эфф}}(\text{B})}, \quad (3)$$

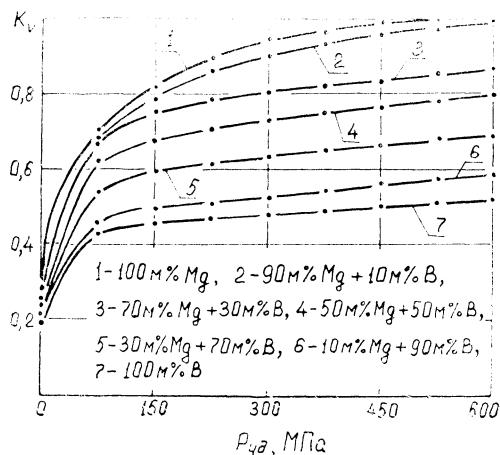


Рис. 2. Кривые прессуемости смесей порошков бора и магния различного состава

где  $\rho_{\text{эфф}}^P(\text{Mg})$  — плотность брикета из порошкового магния при усилии, равном  $P$  Па (берется из эксперимента по прессованию индивидуальных порошковых материалов).

Оценим ориентировочно границы применимости ситуации, когда можно считать, что масса бора больше массы магния. Из экспериментов по прессованию частиц чистого бора при максимальном усилии прессования  $P_{\text{у.л}}^{\text{max}} = 600$  МПа следует, что  $K_v^{\text{max}}(\text{B}) = 0,5244$ , а для магния при этом же значении усилии прессования  $K_v^{\text{max}}(\text{Mg}) \approx 1$ , т. е. теоретически в идеальном брикете может содержаться не более 47,56% магния и 52,44% бора, что для  $\rho_{\text{мон}}(\text{Mg}) = 1,74 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_{\text{мон}}(\text{B}) = 2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> соответствует брикету состава 40,7% мас. Mg + +59,3% мас. B. Таким образом, брикеты, содержащие по весу более 60% бора, условно можно считать отвечающими условию «бора больше, чем магния».

2. Рассмотрим ситуацию, когда масса частиц магния много больше массы частиц бора, а размер частиц бора существенно меньше размера частиц магния. Учитывая эти два условия, при свободной засыпке смеси порошков или при малых усилиях прессования можно считать, что частицы бора будут находиться в пустотах между частицами магния, так что

$$V_{\text{бр}}^P = M(\text{Mg}) / \rho_{\text{эфф}}^P(\text{Mg}). \quad (4)$$

При больших усилиях прессования, когда начинается пластическая деформация частиц магния, пустоты между частицами бора постепенно будут заполняться магнием, так что в пределе, когда

$$\rho_{\text{эфф}}^P(\text{Mg}) \approx \rho_{\text{мон}}(\text{Mg}),$$

$$V_{\text{бр}}^P = \frac{M(\text{Mg})}{\rho_{\text{эфф}}^P(\text{Mg})} + \frac{M(\text{B})}{\rho_{\text{мон}}(\text{B})}. \quad (5)$$

Оценим ориентировочно границы применимости ситуации «масса магния больше массы бора». При приготовлении смеси порошков в начальный момент, когда используется свободная засыпка порошков, в 1 л смеси будет содержаться 27% магния, т. е. 270 см<sup>3</sup> или 470,3 г магния в пересчете на монолит. Оставшиеся 730 см<sup>3</sup> пространства может занимать порошковый бор с величиной коэффициента использования объема  $K_v = 0,199$ , т. е. мелких частиц бора в режиме свободной засыпки порошков может быть не более  $730 \times 0,199$  см<sup>3</sup> = 145,2 см<sup>3</sup> или по весу не более 333,15 г. Таким образом, после прессования смеси порошков можно будет получить брикет состава 41% мас. B + +59% мас. Mg, и брикеты, содержащие менее 40% бора по массе, можно условно считать соответствующими критерию «магния больше, чем бора».

Необходимо отметить, что формула (4) верна только для малых концентраций бора, потому что на практике гораздо вероятнее ситуация, что при приготовлении смеси порошков мелкие частицы бора будут более или менее равномерно покрывать поверхность больших частиц магния, чем случай концентрирования частиц бора в пустотах засыпки из частиц магния, так что данная ситуация более точно должна описываться формулой (3) для «независимого» прессования компонентов смеси. Кроме того, логично предположить, что в режиме

пластической деформации частиц магния пластичному металлу выгоднее не проникать в заполненные частицами бора пустоты, а обтекать твердые частицы бора, покрывающие поверхность частиц магния. Таким образом, по мере увеличения усилия прессования смесь порошков с большим содержанием магния будет последовательно описываться формулами (3) и (5), причем формула (5) будет описывать случай очень больших усилий прессования.

3. Рассмотрим ситуацию, когда  $40\% \text{ мас.} \leq M(\text{B}) \leq 60\% \text{ мас.}$ , т. е. промежуточное положение между рассмотренными выше крайними случаями, и тогда формулы для определения объема брикета должны быть комбинацией формул для предельных концентраций компонентов. Предположим, что такую промежуточную ситуацию можно смоделировать как случай независимого прессования двух брикетов, один из которых отвечает случаю прессования по схеме 1 или 2, а второй брикет состоит либо из чистого порошкового бора, либо из чистого порошкового магния при одном и том же усилии прессования. Проиллюстрируем такой подход на примере брикета состава  $50\% \text{ мас. бора} + 50\% \text{ мас. магния}$ . Первый брикет «конструируем» состава  $70\% \text{ мас. бора} + 30\% \text{ мас. магния}$  по схеме 1 «бора больше, чем магния», а второй брикет полагаем состоящим из одного магния. Для первого брикета на  $50 \text{ г}$  бора необходимо будет  $M_1(\text{Mg}) = 21,43 \text{ г}$  магния, следовательно, второй брикет будет состоять из  $M_2(\text{Mg}) = 28,57 \text{ г}$  магния. Суммарный объем такого комбинированного заряда при малых усилиях прессования можно будет вычислить по формуле

$$V^{1a}_{\text{бр. комб.}} = \frac{M_1(\text{Mg})}{\rho_{\text{мгн}}(\text{Mg})} + \frac{M_2(\text{Mg})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{Mg})} + \frac{M(\text{B})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{B})}, \quad (6)$$

а при больших усилиях прессования — по формуле

$$V^{1б}_{\text{бр. комб.}} = \frac{M(\text{B})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{B})} + \frac{M_2(\text{Mg})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{Mg})}. \quad (7)$$

Если же брикет состава  $50\% \text{ мас. B} + 50\% \text{ мас. Mg}$  конструировать по схеме 2, то такой брикет можно представить в виде суперпозиции двух брикетов, один из которых составлен из чистого бора, а другой имеет состав  $70\% \text{ мас. Mg} + 30\% \text{ мас. B}$ . В этом случае один брикет будет состоять из  $28,57 \text{ г}$  магния и  $21,43 \text{ г}$  бора, а второй брикет будет состоять из  $28,57 \text{ г}$  бора (пересчет сделан для исходной смеси « $50 \text{ г}$  магния +  $50 \text{ г}$  бора»). Суммарный объем такого брикета при малых усилиях прессования можно будет вычислить по формуле

$$V^{2a}_{\text{бр. комб.}} = \frac{M(\text{Mg})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{Mg})} + \frac{M_2(\text{B})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{B})}, \quad (8)$$

а при больших усилиях прессования — по формуле

$$V^{2б}_{\text{бр. комб.}} = \frac{M(\text{Mg})}{\rho^{\text{пэфф}}(\text{Mg})} + \frac{M_{\Sigma}(\text{B})}{\rho_{\text{мон}}(\text{B})}. \quad (9)$$

В таблице приведены сравнительные данные по удельной плотности брикетов с различным содержанием бора и магния при различных усилиях прессования, полученные из эксперимента (рис. 3) и рассчитанные по формулам (1)—(9) в соответствии с массовой

долей того или иного компонента. Из приведенных данных видно, что удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных имеет место лишь для предельных случаев преобладания одного из компонентов смеси и для областей больших и малых усилий прессования. Случаи промежуточных значений усилий прессования и концентраций компонентов могут быть удовлетворительно описаны только комбинацией формул (1) — (9).

Используя формулы (1) — (9), рассмотрим поведение зависимости удельной теплотворной способности зарядов от массовой доли магния в смеси  $\Delta Q_{уд} = \Delta Q_{уд} (\% \text{ мас. Mg})$ . Коэффициент заполнения объема заряда  $K_v$  будем рассчитывать по рабочей формуле:

$$K_v = \frac{\rho_{\text{факт.}}}{\rho_{\text{теор.}}} = \frac{m_{\text{бр.}}/V_{\text{бр. факт.}}}{m_{\text{бр.}}/V_{\Sigma \text{мон}}} = \frac{V_{\Sigma \text{мон}}}{V_{\text{бр. факт.}}}, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{факт.}} = m_{\text{бр.}}/V_{\text{бр. факт.}}$  — фактическая плотность брикета;  $\rho_{\text{теор.}} = m_{\text{бр.}}/V_{\Sigma \text{мон}}$  — теоретическая плотность брикета в пересчете на монолит;  $m_{\text{бр.}}$  — суммарная масса компонентов брикета;  $V_{\text{бр. факт.}}$  — фактический объем брикета после прессования при заданном усилии прессования;  $V_{\Sigma \text{мон}}$  — суммарный объем компонентов в пересчете на монолит.

Удельные энергетические характеристики брикетов определяются зависимостью

$$\Delta Q_{уд}^v = (m_1 \Delta Q^{m_1} + m_2 \Delta Q^{m_2}) / V_{\text{бр. факт.}}, \quad (11)$$

где  $m_1, m_2$  — массы компонентов смеси;  $\Delta Q^{m_1}, \Delta Q^{m_2}$  — удельные высшие массовые теплотворные способности компонентов при их сжигании, например, в кислороде.

Рассмотрим случай «масса бора больше массы магния» при малых и при больших усилиях прессования. За верхнюю границу интервала усилий прессования, которые условно можно считать «малыми», примем усилие прессования, равное  $P_{уд.} = 75$  МПа, а за начало области «больших» усилий прессования примем усилие прессования, равное  $P_{уд.} = 525$  МПа. Численные значения параметров, входящих в расчетные зависимости, будем брать из экспериментов. Для смеси, содержащей 90% мас. бора и 10% мас. магния, при малых усилиях прессования с учетом соотношения (1) будем иметь

$$\Delta Q_{уд.}^v = \frac{\varepsilon M_{\Sigma} \Delta Q_1^m + (1-\varepsilon) M_{\Sigma} \Delta Q_2^m}{(\varepsilon M_{\Sigma} / \rho_{1\text{мон}}) + [(1-\varepsilon) M_{\Sigma} / \rho_{2\text{эфф}}]}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_m$  — массовая доля магния в смеси;  $M_{\Sigma}$  — общая масса брикета;  $\Delta Q^{m_1}, \Delta Q^{m_2}$  — удельные массовые теплотворные способности магния и

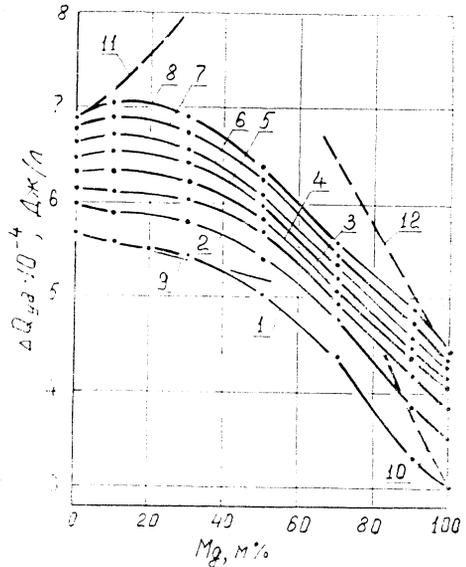


Рис. 3. Зависимость удельной литровой теплотворной способности брикетов от состава и усилий прессования (окислитель — кислород): 1—75 МПа, 2—150 МПа, 3—225 МПа, 4—300 МПа, 5—375 МПа, 6—450 МПа, 7—525 МПа, 8—6 0 МПа, 9 — формула (12), 10—формула (16), 11—формула (15), 12—формула (17)

Сравнение расчетных и экспериментальных величин плотности зарядов с различным содержанием бора и магния при различных усилиях прессования

Состав смеси и плотность, кг/м <sup>3</sup> · 10 <sup>-3</sup>	Усилие прессования, МПа					
		75	150	300	525	600
Состав: 100% мас. В						
$\rho_{\text{эксп}}$		0,994	1,040	1,107	1,189	1,206
Состав: 100% мас. Mg						
$\rho_{\text{эксп}}$		1,220	1,419	1,632	1,74	1,74
Состав: 90% мас. В + 10% мас. Mg						
$\rho_{\text{эксп}}$		1,033	1,089	1,171	1,276	1,302
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (3)		1,039	1,083	1,149	1,227	1,244
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (4)		1,105	1,155	1,230	1,321	1,340
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (5)		1,013	1,068	1,144	1,227	1,244
Состав: 7% мас. В + 30% мас. Mg						
$\rho_{\text{эксп}}$		1,148	1,232	1,319	1,423	1,457
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (3)		1,141	1,182	1,243	1,313	1,329
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (4)		1,420	1,485	1,581	1,698	1,723
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (5)		1,053	1,130	1,225	1,313	1,329
Состав: 70% мас. Mg + 30% мас. В						
$\rho_{\text{эксп}}$		1,278	1,404	1,494	1,592	1,624
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (5)		1,142	1,279	1,429	1,527	1,536
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (6)		1,742	2,027	2,332	2,486	2,486
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (7)		1,420	1,603	1,788	1,877	1,877
Состав: 90% мас. Mg + 10% мас. В						
$\rho_{\text{эксп}}$		1,199	1,405	1,604	1,746	1,779
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (5)		1,193	1,369	1,558	1,663	1,666
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (6)		1,355	1,577	1,813	1,933	1,933
$\rho_{\text{теор.}}$ по формуле (7)		1,280	1,475	1,681	1,783	1,783

бора;  $\rho_{\text{монолит}}$  — плотность монолитного магния;  $\rho_{2\text{эфф}}^P$  — эффективная плотность брикета из чистого бора при выбранном усилии прессования. Выражение (12) можно переписать в виде

$$\Delta Q_{\text{уд.}}^v(\epsilon) = \Delta Q_{2\text{эфф}}^m \rho_{2\text{эфф}}^P (1 - a\epsilon) / (1 - b\epsilon), \quad (13)$$

где  $a = (\Delta Q_{m_2} - \Delta Q_{m_1}) / \Delta Q_{m_2} > 0$ ,  $b = (\rho_{\text{мон}} - \rho_{2\text{эфф}}^P) / \rho_{\text{мон}} > 0$ ,

поскольку в рассматриваемом интервале усилий прессования (до 75 МПа)  $\rho_{\text{мон}} > \rho_{2\text{эфф}}^P$ , а  $\Delta Q_{m_2} > \Delta Q_{m_1}$ . Из зависимости (13) следует, что

$$\frac{d[\Delta Q_{\text{уд.}}^v(\epsilon)]}{d\epsilon} = \frac{b-a}{(1-b\epsilon)^2} = A(\epsilon). \quad (14)$$

Поскольку для нашего случая  $\Delta Q_{m_2} = \Delta Q_{\text{уд.}}^m(\text{В}) = 57234$  кДж/кг,  $\Delta Q_1 = \Delta Q_{\text{уд.}}^m(\text{Mg}) = 24911$  кДж/кг (сжигание в кислороде),  $\rho_{\text{мон}} = \rho(\text{Mg}) = 1,74 \times 10$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{2\text{эфф}}^P = 0,9943 \times 10$  кг/м<sup>3</sup>, то  $a = 0,5648$ ,  $b = 0,429$ , и из выражения (14) следует, что при малых усилиях прессования с ростом массовой доли магния в смеси (т.е. с ростом  $\epsilon$ ) удельная теплопроизводительность брикетов падает, так как  $A < 0$ .

Для смесей с малым содержанием магния при больших усилиях прессования с учетом формулы (2) будем иметь соотношение

$$\Delta Q^v_{уд}(\varepsilon) = \frac{\varepsilon \Delta Q_1^m + (1-\varepsilon) \Delta Q_2^m}{(1-\varepsilon)/\rho^{P_{2эфф}}} = \Delta Q^m_2 \rho^{P_{2эфф}} \frac{1-\varepsilon(1-\Delta Q_1^m/\Delta Q_2^m)}{1-\varepsilon} = \gamma \frac{1-a\varepsilon}{1-\varepsilon}, \quad (15)$$

где  $\gamma = \Delta Q^m_2 \rho^{P_{2эфф}}$ ,  $a = (\Delta Q^m_2 - \Delta Q^m_1) / \Delta Q^m_2 < 1$ .

Так как  $a < 1$ , то из формулы (15) следует, что для брикетов из смесей с малым содержанием магния при больших усилиях прессования удельная теплопроизводительность брикетов с увеличением массовой доли магния возрастает.

Для случая брикетов из смесей с большим содержанием магния при малых усилиях прессования в соответствии с формулой (4) будем иметь

$$\Delta Q^v_{уд} = \frac{\varepsilon \Delta Q_1^m + (1-\varepsilon) \Delta Q_2^m}{(\varepsilon/\rho^{P_{1эфф}})} = \Delta Q^m_2 \rho^{P_{1эфф}} \frac{1-a\varepsilon}{\varepsilon}, \quad (16)$$

где  $0 < a = (\Delta Q^m_2 - \Delta Q^m_1) / \Delta Q^m_2 < 1$ ;  $\rho^{P_{1эфф}}$  — эффективная плотность магния при заданном усилии прессования. Для брикетов с большим содержанием магния и при больших усилиях прессования в соответствии с формулой (5) будем иметь зависимость

$$\Delta Q^v_{уд} = \frac{\varepsilon \Delta Q_1^m + (1-\varepsilon) \Delta Q_2^m}{\varepsilon/\rho^{P_{1эфф}} + (1-\varepsilon)/\rho_{2мон}} = \Delta Q^m_2 \rho_{2мон} [(1-a\varepsilon)/(1+c\varepsilon)], \quad (17)$$

где  $\rho_{2мон}$  — плотность бора в монолите;  $c = (\rho_{2мон} - \rho^{P_{1эфф}}) / \rho^{P_{1эфф}}$ .

Поскольку для всех рассматриваемых усилий прессования  $\rho_{2мон} > \rho^{P_{1эфф}}$ , то  $c > 0$ , и из формул (16) и (17) следует, что как при малых, так и при больших усилиях прессования смесей с большим содержанием магния удельная теплопроизводительность брикетов падает с ростом массовой доли магния.

Такой упрощенный теоретический анализ поведения удельной объемной теплопроизводительности брикетов позволяет сделать вывод о наличии экстремума удельной объемной теплопроизводительности для зарядов с малым весовым содержанием магния, получаемых при больших усилиях прессования, что хорошо согласуется с данными [6] о перспективности использования смесевых топлив «бор—магний» и позволяет объяснить ход экспериментальных кривых зависимостей  $\Delta Q^v_{уд} = \Delta Q^v_{уд} \% \text{мас. Mg}$ , приведенных на рис. 3, согласно которым для смесей, содержащих от 10 до 30% мас. магния, имеет место экстремум по удельной объемной теплопроизводительности, начиная с усилия прессования  $P_{уд} > 225$  МПа.

### Экспериментальное исследование брикетов из смесей порошков магния и бора

Экспериментальная зависимость удельных энергетических характеристик брикетов из порошков бора и магния изучалась на смесях порошков бора марки Б-98 с дисперсностью частиц до 5 мкм и магния марки МПФ-100 дисперсностью до 100 мкм с вариацией массового содержания компонентов и величин удельного усилия прессования. Столь большое различие в дисперсности составляющих смесь компонентов было выбрано как из условий обеспечения необходимой плотности брикета после прессования, так и из условия исключения возможных нежелательных реакций химического взаимодействия между частицами магния и бора, которые могут сопровождаться выделением большого количества тепла. Так, например, образование бориды магния  $B_2Mg_3$ , известное по реакциям высокотемпературного

самораспространяющегося синтеза (СВС-синтез), теоретически возможно при прессовании гомогенных смесей тонкодисперсных порошков бора и магния, поскольку при быстром нагружении пуансона общая температура брикета может подняться на несколько градусов, а локальные перегревы могут достигать нескольких десятков градусов. Использование же частиц бора и магния фазной дисперсности снижает вероятность получения микрообъемов заряда стехиометрического состава, достаточных для начала процесса СВС-синтеза. Необходимо отметить, что в ходе выполнения экспериментов по прессованию не наблюдалось сколько-нибудь заметного разогрева брикетов, что, по-видимому, связано как со значительной массой матрицы и пуансона (отношение  $M_{\text{матр}}/m_{\text{брик}} > 50$ ), так и со сравнительно невысокой скоростью нагружения пуансона ( $\sim 400$  Н/с).

Порошки магния и бора, взятые в необходимых для проведения опытов пропорциях, перемешивались во вращающемся цилиндрическом смесителе с лопастными вставками в течение 30—40 мин при частоте вращения  $\sim 100$  об/мин, после чего смесь порошков загружалась в стальную закаленную матрицу, изготовленную из стали и прошедшую соответствующую термообработку. Высота матрицы равнялась 110 мм, диаметр отверстия  $\sim 20,5$  мм. Высота свободной засыпки смеси порошков в матрицах составляла в среднем 100 мм.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная методика расчета удельных энергетических характеристик порошковых смесей «бор—магний» с использованием индивидуальных параметров прессуемости компонентов дает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений для предельных случаев преобладания одного из компонентов в смеси и для областей малых и больших усилий прессования. В случае промежуточных значений усилий прессования и концентраций компонентов удельные энергетические характеристики могут быть удовлетворительно описаны комбинацией расчетных зависимостей.

2. Экспериментальные исследования прессуемости смесей порошков бора и магния показали, что с ростом усилия прессования и увеличением доли магния в смеси до 30% мас. увеличиваются коэффициент объемного заполнения брикета и объемные энергетические характеристики, улучшаются эксплуатационные (в частности, прочностные) характеристики, а брикеты, получаемые прессованием при 300—600 МПа смесей, содержащих 10—30% по массе магния и 70—90% по массе бора, могут быть рекомендованы как оптимальные.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
2. Некрасов Б. В. Основы общей химии. М.: Химия, 1969. Т. 2. 688 с.
3. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1968. 340 с.
4. Александров В. В., Груздев В. А., Коваленко Ю. А. Теплопроводность некоторых СВС-систем на основе алюминия//Физика горения и взрыва. 1985. № 1. Т. 21. С. 98—104.
5. Золотко А. Н., Мацко А. М., Полищук Д. И., Буйновский С. Н., Гапоненко Л. А. Воспламенение двухкомпонентной газозвеси частиц металлов//Физика горения и взрыва. 1980. № 1. Т. 16. С. 23—26.
6. Шмидт Х., Лайнберги Дж., Кроуфорд Л. Критерии проектирования мощных импульсных МГД-генераторов на высокоэнергетических топливах//Экспресс-информация «Астронавтика и ракетодинамика». № 16. 1988. Реф. № 77. С. 24—40.