

Ni или Fe практически полностью окислятся. Поэтому появление интерметаллических соединений в смесях нанометаллов с инертным связующим маловероятно. Результаты экспериментов подтвердили это предположение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования морфологических изменений продуктов окисления смесей двух нанометаллов с активным связующим в диапазоне температур от 25 до 1220 °С. Это позволило получить более полное представление о протекающих в топливных системах физико-химических процессах.

Применение в энергетических материалах на основе активного связующего электро-взрывного алюминия и каталитических добавок нанопорошков Fe, Ti, Ni или Cu приводит к увеличению общего количества тепла в процессе реализации ЭКС за счёт образования интерметаллических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 432 с.
2. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П. и др. Горение нанопорошков металлов. – Томск: Дельта-план, 2008. – 382с.
3. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
4. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса /под ред. Мержанова А.Г. – Черногловка: Территория, 2003. – 368 с.
5. Комарова М.В., Комаров В.Ф., Ворожцов А.Б. Процессы, протекающие в высокоэнергетических системах, содержащих наноразмерные порошки металлов // Известия вузов. Физика. – 2011. – № 12. – С. 107 – 111.
6. Комарова М.В., Комаров В.Ф. Поведение наноразмерных металлических порошков в вязком электролите // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Успехи в специальной химии и химической технологии». Москва. – 2010. – С. 260 – 264.

7. Комарова М.В., Комаров В.Ф., Вакутин А.Г., Яценко А.В. Влияние наноразмерных биметаллических частиц на характеристики горения смесового топлива // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4 – 1. С. 112 – 115.

8. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов. Справочное руководство. – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.

9. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. – М.: Металлургия, 1975. – 248 с.

10. Комарова М.В., Вакутин А.Г., Бычин Н.В. Лабораторные методы исследования процесса окисления УДП металлов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4 – 1. С. 131 – 136.

11. Иванов В.Г., Гаврилюк О.В. Закономерности окисления и самовоспламенения на воздухе электровзрывных ультрадисперсных порошков металлов // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35. – № 6. – С.53 – 60.

Комарова Марина Витальевна, младший научный сотрудник лаборатории «Физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН), 659322 г. Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1, E-mail: mv10mv@mail.ru. Р.т. (3854)301866.

Комаров Виталий Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН), 659322 г. Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1. E-mail: ipcet@mail.ru. Р.т. (3854)305805.

Бычин Николай Валерьевич, старший научный сотрудник лаборатории «Физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН), 659322 г. Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1, E-mail: ipcet@mail.ru. Р.т. (3854)301528.

УДК 662.1/.4

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Ю.В. Передерин, Н.И. Попок

Представлены результаты моделирования и прогнозирования метательной способности индивидуальных компонентов высокоэнергетических композитов. Показано, что при моделировании с использованием нейросетевого алгоритма прогнозирование осуществляется с

точностью, соответствующей реализуемой существующими стандартными экспериментальными методами определения рассматриваемой характеристики. В качестве сравнения приведены данные по прогнозированию метательной способности с помощью линейно-регрессионного анализа.

Ключевые слова: высокоэнергетические композиты, метательная способность, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоемкие вещества (высокоэнергетические композиты, их индивидуальные компоненты) и изделия из них имеют разнообразную номенклатуру, свойства, технологии изготовления и области применения. Высокоэнергетические композиты (ВЭК) нашли широкое применение в различных областях хозяйственной деятельности человека и при создании образцов специальной техники: промышленные взрывчатые вещества, пороха, топлива для ракетных двигателей.

Важным аспектом создания, хранения и эксплуатации является определение физико-химических свойств компонентов высокоэнергетических композитов, в том числе и взрывчатых, с целью дальнейшего прогнозирования аналогичных свойств составов и изделий на их основе при хранении, транспортировке и эксплуатации, а также на стадии выбора составов композитов для решения частных задач. В связи с этим следует упомянуть, что для определения свойств взрывчатых веществ су-

ществует целый ряд методик, в конечном итоге не дающий четкого представления о реальной опасности для людей и производств, имеющих дело со специальными продуктами.

Классическая статистика в некоторых случаях путем усреднения результатов многочисленных экспериментов и игнорирования явных экстремумов может выдать результаты, в некотором приближении отражающие реальную картину по выбранному показателю, но иногда погрешность такой обработки может составлять сотни процентов.

Изложенное выше является основанием необходимости моделирования и прогнозирования свойств компонентов высокоэнергетических композитов с целью прогноза характеристик вновь создаваемых ВЭК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Согласно [1], кинетическая энергия ускоряемого тела пропорциональна объемному энергосодержанию взрывчатого вещества, коэффициент отбора энергии зависит от объемного числа молей газообразных продуктов взрыва. В связи с этим была предложена гипотеза о влиянии на метательную способность индивидуальных компонентов высокоэнергетических композитов их плотности и природы атомов, входящих в состав их молекул (энергосодержание и состав газообразных продуктов взрыва). Для проведения исследований на основе экспериментальных и литературных данных [1] была разработана электронная база, содержание которой приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Разработанная электронная база данных по свойствам индивидуальных компонентов высокоэнергетических композитов

Название	Содержание в молекуле				Плотность, кг/м ³	Скорость метания, м/с
	углерода	водорода	азота	кислорода		
Нитрометан	1	3	1	2	1140	1092
Бис-(нитраминометил)-нитрамин	2	6	6	6	1850	1907
Гексоген	3	6	6	6	1800	1781
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	4	4	8	14	1850	1530
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	4	4	8	14	1900	1650
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	4	4	8	14	1940	1792
Октоген	4	8	8	8	1730	1660
Октоген	4	8	8	8	1810	1770
Октоген	4	8	8	8	1890	1840
Октоген	4	8	8	8	1910	1910
Октанитро-диазаоктан	6	8	10	14	1860	1683
Тринитроэтиловый эфир тринитромасляной кислоты	6	6	6	14	1780	1507

Продолжение Таблицы 1

Название	Содержание в молекуле				Плотность, кг/м ³	Скорость метания, м/с
	углерода	водорода	азота	кислорода		
Метилнитрат	1	3	1	3	1210	1133
Диэтанолнитраминдинитрат	4	8	4	8	1670	1616
Тетранитропентаэритрит	5	8	4	12	1670	1661
Тетранитропентаэритрит	5	8	4	12	1760	1790
Гексанитробензол	6	0	6	12	1960	1710
Гексанитробензол	6	0	6	12	1860	1616
Триаминотринитробензол	6	6	6	6	1800	1470
Тетрил	7	5	5	8	1700	1594
Гексанитростильбен	14	6	6	12	1650	1440
5-оксо-3-нитро-1,2,4-триазол	2	2	4	3	1850	1330
Тринитротолуол	7	5	3	6	1630	1460

Примечание: скорость метания является скоростью расширения медной цилиндрической оболочки [1]

На основе нейросетевого алгоритма [2-7] разработанная электронная база данных была обработана с помощью линейно-регрессионного анализа. Без каких-либо изменений та же база была проанализирована с использованием нейросетевого алгоритма. Результаты моделирования с помощью линейной регрессии и нейронной сети приведены в таблице 2. Для оценки корректности моделирования обе модели были проверены на веществах, свойства которых отсутствуют в исходной базе данных, а также были проведены исследования по вос-

производимости полученных результатов.

При моделировании метательной способности при расширении медной цилиндрической оболочки с использованием линейной регрессии среднее отклонение составило 78 м/с, тогда как применение нейросетевого алгоритма дало среднее отклонение 29 м/с, что находится на уровне точности, соответствующей реализуемой существующими стандартными экспериментальными методами определения рассматриваемой характеристики.

Таблица 2 – Результаты обработки разработанной базы данных с помощью линейной регрессии и с использованием нейронной сети

Название	Скорость метания, м/с	Скорость метания (прогноз, линейная регрессия), м/с	Отклонение от экспериментального значения (линейная регрессия), м/с	Скорость метания (прогноз, нейронная сеть), м/с	Отклонение от экспериментального значения (нейронная сеть), м/с
Нитрометан	1092	1070	22	1101	9
Бис-(нитраминометил)-нитрамин	1907	1734	173	1836	71
Гексоген	1781	1677	104	1774	7
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1530	1691	161	1557	27
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1650	1732	82	1661	11
Бис-(тринитроэтил)-нитрамин	1792	1764	28	1735	57
Октоген	1660	1676	16	1653	7
Октоген	1770	1741	29	1785	15
Октоген	1840	1806	34	1850	10
Октоген	1910	1822	88	1860	50

Название	Скорость метания, м/с	Скорость метания (прогноз, линейная регрессия), м/с	Отклонение от экспериментального значения (линейная регрессия), м/с	Скорость метания (прогноз, нейронная сеть), м/с	Отклонение от экспериментального значения (нейронная сеть), м/с
Октанитро-диазаоктан	1683	1788	105	1673	10
Тринитроэтиловый эфир тринитромасляной кислоты	1507	1675	168	1598	91
Метилнитрат	1133	1134	1	1134	1
Диэтанолнитраминдинитрат	1616	1645	29	1704	88
Тетранитропентаэритрит	1661	1660	1	1591	70
Тетранитропентаэритрит	1790	1732	58	1759	31
Гексанитробензол	1710	1610	100	1764	54
Гексанитробензол	1616	1529	87	1576	40
Триаминотринитробензол	1470	1628	158	1474	4
Тетрил	1594	1518	76	1576	18
Гексанитростильбен	1440	1422	18	1439	1
5-оксо-3-нитро-1,2,4-триазол	1330	1589	259	1323	7
Тринитротолуол	1460	1454	6	1461	1

ВЫВОДЫ

В результате исследований разработана электронная база данных по свойствам индивидуальных компонентов высокоэнергетических композитов. При моделировании метательной способности взрывчатых веществ медной цилиндрической оболочки с помощью линейной регрессии и с использованием нейросетевого алгоритма показано, что точность прогнозирования с использованием нейронной сети соответствует реализуемой стандартными методами испытаний. В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о том, что использование нейронных сетей при прогнозировании метательной способности индивидуальных компонентов высокоэнергетических композитов является предпочтительным по сравнению с линейно-регрессионным методом анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реут, И.И. Расчет метательной способности взрывчатых веществ при цилиндрическом и торцевом метаниях металла / И.И. Реут, А.Л. Кривченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки. – 2011. – № 4(25). – С. 173-177.
2. Передерин, Ю.В. Использование информационных технологий DATA MINING для прогнозирования характеристик циклических соединений / Ю.В. Передерин // Вестник КГТУ. – 2006. – Т. 32, № 4. – С. 32-38.
3. Передерин, Ю.В. Использование информационных технологий DATA MINING применительно

к прогнозированию параметров безопасности органических соединений / Ю.В. Передерин // Ползуновский вестник. – 2007. – № 3. – С. 87-90.

4. Передерин, Ю.В. Многофакторный анализ и прогноз свойств органических соединений / Ю.В. Передерин // Ползуновский вестник. – 2008. – № 3. – С. 61-62.

5. Передерин, Ю.В. Моделирование и прогнозирование параметров работоспособности энергетических конденсированных систем на основе физико-химических свойств исходных компонентов, являющихся взрывчатыми веществами / Ю.В. Передерин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 295-298.

6. Передерин, Ю.В. Количественный анализ и прогнозирование свойств компонентов энергетических конденсированных систем – бризантных взрывчатых веществ / Ю.В. Передерин, Н.И. Попок // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – С. 126-130.

7. Передерин, Ю.В. Исследование свойств различных энергетических структур для прогнозирования их чувствительности с помощью технологий DATA MINING / Ю.В. Передерин // Перспективы создания и применения конденсированных энергетических материалов: материалы I Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, г. Бийск, 27-29 сентября 2006 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. универ., 2006. – С. 57-62.

Передерин Юрий Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО

РАН), ipcet@yandex.ru, ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия, тел. (3854)30-18-66

Попок Николай Иванович, главный научный сотрудник лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем, доктор технических наук Федерального го-

сударственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия.

УДК 621.454.3 – 181.4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА МОДЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С НЕИЗВЛЕКАЕМОЙ ОСНАСТКОЙ – КАПРОНОВОЙ НИТЬЮ

**А.А. Трубников, В.О. Попов, Г.Н. Нестеров, Б.В. Певченко,
Н.Ф. Панченко, С.А. Зяблицкий, Г.К. Хайновский**

Представлены нестационарная газодинамическая модель расчета внутрибаллистических характеристик, результаты численного моделирования и экспериментальной отработки модельных двигательных установок с неизвлекаемой оснасткой. Проведены испытания на химическую совместимость с наполнителем и механическую прочность материала неизвлекаемой оснастки.

Ключевые слова: модельная двигательная установка, неизвлекаемая оснастка, внутрибаллистические характеристики, высокоэнергетический наполнитель.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при отработке ракетных двигателей на твердом топливе используются конструкции модельных двигательных установок (МДУ), которые можно разделить по типам: на торцевые, с цилиндрическим каналом и канально-щелевые МДУ [1]. Одной из актуальных проблем современного проектирования МДУ является эффективность ее работы, которая обеспечивается высоким коэффициентом заполнения при увеличенной, по сравнению с торцевой, площади поверхности горения. Варьируя геометрией канала наполнителя МДУ достигается площадь поверхности горения, необходимая для заданного режима работы изделия. Высокий уровень заполнения МДУ обеспечивается за счет использования неизвлекаемой оснастки (НО). Первые исследования, посвященные применению НО, в двигательных установках были проведены в 1960-х годах [2], однако практическое применение сдерживалось отсутствием материалов с требуемыми характеристиками и технологическими проблемами, возникающих при изготовлении. На сегодняшний день многие из этих проблемных вопросов решены, и данное направление развитие специальной техники считается перспективным.

В представленной статье в качестве НО рассматривается капроновая нить, которая

может служить скрепляющим звеном для неизвлекаемых элементов, изготовленных из быстрогорящих составов или материалов и композиций на их основе. Скорость горения таких элементов или композиций существенно больше скорости горения наполнителя МДУ. Для НО обязательными требованиями к характеристикам ее применения в МДУ служат достаточный уровень механической прочности и химическая совместимость с высокоэнергетическим наполнителем (ВЭН).

Перед проведением формования и экспериментальной отработки МДУ, следует производить расчет внутрибаллистических характеристик (ВБХ) с использованием специальных методов и моделей, с целью устранения неверно принятых конструкторских решений при проектировании МДУ. В настоящее время разработано достаточно большое число методов расчетов ВБХ, однако наиболее точными из них являются газодинамические методы, в которых применяются нестационарные уравнения, описывающие высокоскоростное движение потока продуктов сгорания по газовому тракту.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА НЕИЗВЛЕКАЕМОЙ ОСНАСТКИ

В качестве материала гибких элементов скрепляющих НО рассмотрены капроновые и