

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА СМЕСЕЙ МЕТАЛЛ-ФТОРОПЛАСТ

И.В. Сайков*, С.Г. Вадченко, И.Д. Ковалев, М.И. Алымов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия
*revan.84@mail.ru

Целью работы является исследование взаимодействия порошковых смесей металлов с полимерной матрицей из политетрафторэтилена (ПТФЭ) при метании на них плоского ударника, а также в условиях ударно-волновой консолидации в цилиндрических ампулах сохранения (рис. 1). Кинетика и термические эффекты этих взаимодействий представляют научный и практический интерес, как для материаловедения при получении новых конструкционных и функциональных материалов [1], так и в сфере применения их в специальной технике [2, 3]. С точки зрения материаловедения актуально исследование принципиальной возможности синтеза в составах, способных к экзотермической реакции, ударно-волновым воздействием и влияние способа инициирования синтеза на структуру и свойства конечных продуктов [4, 5]. Кроме того, при взрывном инициировании экзотермической реакции, возможно её прохождение в высокоскоростном и детонационноподобном режиме [6].

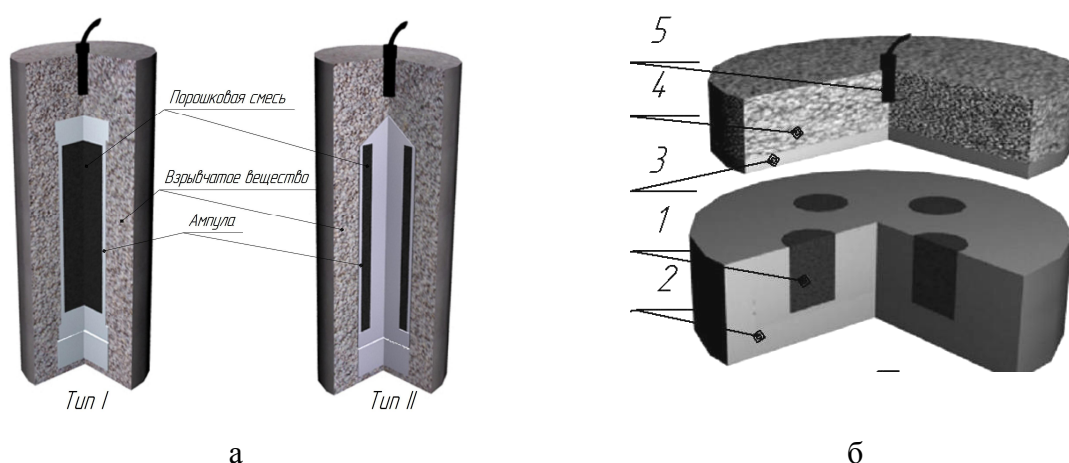


Рис. 1. Схемы ударно-волновой обработки смесей: а – в цилиндрических ампулах сохранения; б – метанием плоского ударника (1 – порошковая смесь; 2 – матрица; 3 – ударник; 4 – ВВ; 5 – детонатор)

Ударно-волновой обработке в цилиндрических ампулах (рис. 1а) подвергались три порошковых состава: двухкомпонентный W+ПТФЭ, а также с добавками Al и Ti+B (табл. 1). Применялись два типа цилиндрических ампул сохранения: со сплошным заполнением (тип I), а также с центральным стержнем (тип II).

В качестве взрывчатого вещества использовался аммонит 6ЖВ. При инициировании детонатора происходила детонация взрывчатого вещества, в результате которой образовывалась концентрически сходящаяся в ампуле ударная волна сжатия.

Таблица 1. Состав исходной шихты.

№	Состав, вес. %					Плотность теор., г/см ³	Плотность факт., г/см ³	Плотность относит.	Тип ампулы
	W	ПТФЭ	Al	Ti	B				
1	90	10	-	-	-	10,86	10,45	0,96	I
2	75	25	+5	-	-	6,14	5,55	0,90	I
3	75	25	+5	-	-	-	-	-	II
4	79	9	2	7	3	8,50	7,20	0,85	I
5	79	9	2	7	3	-	-	-	II

Состав продуктов после компактирования представлен в таблице 2.

Таблица 2. Состав продуктов

№	Состав, вес. %					Тип ампулы	Состав продуктов
	W	ПТФЭ	Al	Ti	B		
1	90	10				I	исходный
2	75	25	+5			I	W, WC, W ₂ C, AlF ₃
3	75	25	+5			II	исходный
4	79	9	2	7	3	I	W, W ₂ C и W ₂ B, WB, TiC
5	79	9	2	7	3	II	W, W ₂ C и W ₂ B, WB, TiC, WC

При подготовке к экспериментам по метанию стального ударника на поверхность образца проведены ориентировочные термодинамические расчеты, с учетом которых были изготовлены 16 различных смесей и образцы из них. Состав смесей, их характеристики, расчетный и фактический фазовый состав продуктов приведены в таблице 3.

В двухкомпонентном образце №1 (табл. 2) W+ПТФЭ в ампуле тип I, а также в образце № 3 (табл. 2) с добавкой Al в ампуле тип II новых фаз не обнаружено. В ампуле тип I в образце №2 (табл. 2) с добавкой Al зафиксировано прохождение реакции с образованием WC, W₂C и AlF₃ только в нижней части образца.

Таблица 3. Исходные составы, расчетные конденсированные продукты, значения адиабатической температуры горения (T_{ad} , °C), удельного объема газообразных продуктов (V_g , л/г), фактические результаты рентгенофазового анализа

N	Состав	Плотн. факт., ρ , г/см ³	Плотн. отн., ρ_{rel}	Конденс. продукты (моль/вес.%)	T_{ad} , °C	V_g , л/г	РФА
1	W-Al-C ₂ F ₄	4.91	0.69	Al(L) 0.36/4.9 W ₂ C(S) 0.4/76 W(S) 0.015/14	1370	0.52	W, Al, AlF ₃ , W ₂ C
2	W-Ti-C ₂ F ₄	5.65	0.67	TiC(S) 0.044/13 W ₂ C(S) 0.36/67.7 Ti(L) 0.26/6 W(S) 0.02/9.4	2240	0.35	W, Al
3	W-Hf-C ₂ F ₄	6.635	0.7	HfC(S) 0.17/16 W ₂ C(S) 0.23/44 W(S) 0.18/17	2090	0.17	W, Hf, W ₂ C, HfF ₄
4	W-Ta-C ₂ F ₄	8.25	0.77	Ta ₂ C(S) 0.003/0.6 W ₂ C(S) 0.4/75 W(S) 0.02/19.5	2730	0.21	-
5	Ni-Al-C ₂ F ₄	3.043	0.67	NiAl(L) 0.848/72.7 C(S) 0.2/2.4 Ni(L) 0.2/11.9	1740	0.35	Ni, Al, NiAl
6	Ni-Al-C ₂ F ₄ , (Ni+Al)-нано	2.94	0.65	NiAl(L) 0.42/42 NiAl(S) 0.58/58	1640	0	NiAl, Ni ₂ Al ₃
7	Ni-Al-C ₂ F ₄ , (Ni+Al)-нано	2.94	0.65	NiAl(L) 0.848/72.7 C(S) 0.2/2.4 Ni(L) 0.2/11.9	1740	0.35	-
8	Ni-Al-C ₂ F ₄ , (Ni+Al)-МА	3.17	0.75	NiAl(L) 0.848/72.7 C(S) 0.2/2.4 Ni(L) 0.2/11.9	1740	0.35	NiAl, AlF ₃ , Ni ₂ Al ₃
9	Hf-Al-C ₂ F ₄	5.23	0.83	Al(L) 0.24/3.3 HfC(S) 0.4/38 Hf(S) 0.44/39	2030	0.84	Hf, HfC
10	Ti-B- C ₂ F ₄	2.29	0.66	TiB ₂ (L) 0.34/24 TiB(S) 0.3/18 TiB ₂ (S) 0.42/29 TiC(S) 0.2/12	2920	0.6	TiC, TiB ₂
11	Hf-B-C ₂ F ₄	3.19	0.53	HfB ₂ (L) 0.25/28 HfC(S) 0.4/42 Hf(L) 0.18/18	3280	0.65	HfB ₂
12	Ni-B-C ₂ F ₄	3.87	0.69	B ₄ C(S) 0.08/4.4 NiB(S) 0.48/33 C(S) 0.12/1.5 Ni(L) 0.88/52	1600	0.24	Ni, Ni ₂ B
13	Cu-Al-C ₂ F ₄	3.09	0.69	Al(L) 0.62/16.7 Cu(L) 0.94/60	1190	0.24	Cu, Al, CuAl ₂ , Cu ₉ Al ₄
14	Ti-Cu-C ₂ F ₄	3.32	0.71	TiC(S) 0.2/12 Cu(L) 0.47/30 Ti(S) 0.49/23.4 Ti(L) 0.42/20.4	1670	0.23	-
15	Nb-Al-C ₂ F ₄	3.44	0.69	Nb ₃ Al(S) 0.005/0.8 NbAl ₃ (L) 0.86/79 NbC(S) 0.2/11	1410	0.28	Nb, Al, NbAl ₃
16	Hf-B-C ₂ F ₄	3.47	0.74	Ni(L) 0.51/30 Ti(S) 0.91/44	1644	0.22	-

Это согласуется с результатами работы [7], в которой показано, что при отражении проходящей ударной волны от нижней крышки ампулы в виде волны сжатия в нижней части ампулы наблюдается резкое повышение давления, что сопровождается ростом скорости химических превращений. Наиболее интенсивно реакция проходила в составе с добавками Al, Ti и B (образцы 4, 5). Основная часть продукта в ампулах обоих типов оказалась утеряна вследствие их разгерметизации и выноса продуктов реакции.

В случае присутствия бора в исходной шихте наблюдается преимущество реакции вольфрама с бором по сравнению с реакцией вольфрама и углерода. Большое количество углерода из ПТФЭ уходит на образование TiC в случае присутствия титана в исходной шихте. То есть реакция Ti+C имеет преимущество над реакцией W+C. Фтор из ПТФЭ расходуется на образование AlF₃. После успешного прохождения реакции во всех случаях в продуктах находится остаток (10–19%) не участвовавшего в ней вольфрама.

Экспериментально показана существенная роль «активирующих» добавок (Al, Ti, B) на инициирование, прохождение химической реакции в порошковой смеси и итоговое фазообразование. В аналогичных условиях двухфазная смесь W+фторопласт не прореагировала.

Как видно из таблицы 3 в большинстве составов, подвергнутых ударно-волновой обработке метанием стального ударника была инициирована химическая реакция. В части ячеек (табл. 3 образцы 4, 7, 14, 16) не удалось сохранить продукт для последующего рентгенофазового анализа.

Наиболее полно (без остатка исходного металла) прореагировали составы 6 (Ni–Al–C₂F₄ нано), 8 (Ni–Al–C₂F₄ МА), 10 (Ti–B–C₂F₄), 11 (Hf–B–C₂F₄), важно отметить, что последние две системы являются наиболее выгодными в плане энерговыделения, их адиабатические температуры горения составляют 2920°C и 3280°C соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00777 а.

Литература

1. Н.А. Адаменко, А.В. Фетисов, А.В. Казуров. Взрывная обработка металлополимерных композиций. Волгоград, ВолгГТУ, 2007, 251 стр.
2. Н.А. Имховик, В.В. Селиванов, А.К. Симонов, А.И. Сергеева, В.Б. Яшин. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах

повышенного могущества действия. *Вооружение и экономика*, 2014, т. 26, № 1, стр. 53–63.

3. В.Б. Яшин, В.В. Алексеев, С.П. Ходырев, А.В. Малкин, А.И. Малкин, Н.А. Имховик, А.К. Симонов. Параметры фугасного действия зарядов ТНТ, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композитов. *Горение и взрыв*, 2012, №5, стр. 360–365.

4. М.И. Алымов, Л.Б. Первухин, А.С. Рогачев, О.Л. Первухина, И.В. Сайков. Комбинирование СВС и ударно-волнового компактирования для получения композиционных материалов. *Письма о материалах*, 2014, т. 3, № 4, стр. 153 – 158.

5. М.И. Алымов, С.Г. Вадченко, И.В. Сайков, И.Д. Ковалев. Ударно-волновая обработка порошковых композиций на основе вольфрама и фторполимера. *Перспективные материалы*, 2016, №11, стр. 55–60.

6. С.А. Зелепугин, А.Ю. Долгобородов, О.В. Иванова, А.С. Зелепугин. Ударно-волновой синтез в твердых смесях. Томск, Изд-во ИОА СО РАН, 2012, 230 стр.

7. С.А. Зелепугин, О.В. Иванова, А.С. Юношев, А.С. Зелепугин. Разрушение цилиндрических ампул, содержащих твердофазно реагирующие смеси, в условиях взрывного нагружения. *Письма о материалах*, 2015, т. 5, № 4, стр. 468–472.