

УДК 666.233: 534.222

DOI: 10.15372/KhUR2019192

Зависимость содержания алмазной фазы в конденсированном детонационном углероде от концентрации тротила в составе взрывчатой смеси тротил/диэтанолнитраминдинитрат

Н. В. КОЗЫРЕВ¹, П. И. КАЛМЫКОВ^{1,2}, А. Г. ВАКУТИН¹, К. А. СИДОРОВ^{2,3}¹Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
Бийск (Россия)

E-mail: kozyrev@ipcet.ru

²Федеральный научно-производственный центр "Алтай",
Бийск (Россия)³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск (Россия)

Аннотация

Методом рефрактометрии исследованы процессы растворения тринитротолуола (ТНТ) в низкоплавком взрывчатом нитраmine – диэтанолнитраминдинитрате (ДИНА) – и построена диаграмма состояния системы ТНТ/ДИНА. Определены значения энтальпии растворения ТНТ в ДИНА в диапазоне температур 55–75 °С. Экспериментально исследованы зависимости выхода конденсированного углерода (КУ), детонационного наноалмаза (ДНА) и содержания ДНА в КУ от состава литых сплавов ТНТ с ДИНА при детонации во взрывной камере. Показано, что выход конденсированного углерода линейно падает с уменьшением количества тротила в составе; содержание алмазной фазы в КУ при этом проходит через максимум. Максимальный выход ДНА достигается при содержании тротила в смеси, близкой к эвтектике (~40 мас. %).

Ключевые слова: ТНТ, ДИНА, энтальпия растворения, детонационный синтез, детонационный наноалмаз

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее подробно синтез детонационных наноалмазов (ДНА) изучен для сплавов тротил–гексоген. В статье [1] указано, что синтез ДНА впервые осуществлен еще в 1963 г. Исследованы чистый тротил и его смеси с гексогеном в соотношении 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 с использованием зарядов в виде дисков, шаров, цилиндров. В работе [2] исследованы основные закономерности процесса синтеза и построена качественная модель явлений, определяющих синтез ДНА. Изучены варианты от чистого тринитротолуола (ТНТ, тротила) для его смеси с гексогеном вплоть до соотношения 30 : 70 с шагом 10 %. Обнаруже-

но, что наибольший выход ДНА обеспечивают сплавы с массовым отношением компонентов 50 : 50. Кроме того, испытаны смеси тротила с октогеном в соотношении 70 : 30 и 30 : 70. Подробно влияние содержания тротила в сплавах с различными взрывчатыми веществ (ВВ) изучено в работе [3]. Исследован как чистый тротил, так и его смеси с гексогеном, октогеном и тетранитропентаэритритом (ТЭН). Установлено, что максимальный выход достигается при содержании тротила ~60 % для смесей с гексогеном и октогеном, и при 65–70 % для смесей с ТЭН. Ряд работ посвящен изучению процесса синтеза из сплавов ТНТ–гексоген в области наибольшего выхода ДНА [4–6]. Так, в работе [4] изучен сплав ТНТ–

гексоген 50 : 50, а в [5] – сплав 65 : 35. Влияние массы водяной оболочки на поверхности заряда на выход ДНА из смеси ТНТ/гексоген (55.5 : 44.5) описано в работе [6].

Поскольку выход ДНА из чистого ТНТ довольно мал, актуален поиск других, более мощных взрывчатых веществ (ВВ), позволяющих при добавлении к тротилу повысить количество получаемого алмаза. Так, в [7] испытаны сплавы ТНТ с триаминотринитробензолом (ТАТВ) (50 : 50) и нитрогуанидином (NQ) (50 : 50), а также с гексогеном (40 : 60). Литые и прессованные заряды из пентолита (ТНТ–ТЭН, 50 : 50) использованы для определения выхода ДНА при взрыве в различных газовых средах [8]. Полициклические взрывчатые нитрамины ВСНМХ (2,4,6,8-тетранитро-1Н,5Н-2,4,6,8-тетраазабицикло[3,3,0]октан) и Аврора (4,8,10,12-тетранитро-2,6-диокса-4,8,10,12-тетраазаизовюрцитан) в качестве добавок к тротилу изучены авторами [9]. Эти вещества, близкие по мощности к октогену, но с меньшим кислородным балансом, позволяют несколько повысить выход ДНА в сравнении с гексогеном и октогеном при оптимальном содержании в смеси 60–70 %. Еще меньший кислородный баланс имеет бензотрифуроксан (БТФ) – безводородное ВВ, также близкое по мощности к гексогену и октогену. Сплав ТНТ–БТФ (60 : 40) исследован в статье [10]. Применение БТФ в качестве добавки к тротилу также позволяет несколько повысить выход ДНА в сравнении с октогеном.

Одно из наиболее мощных ВВ на сегодня – гексанитрогексаазаизовюрцитан (CL-20), превосходящий по плотности и скорости детонации как гексоген, так и октоген. Его использование в качестве добавки к тротилу позволяет повысить плотность заряда, а следовательно, и детонационное давление. В связи с этим можно ожидать значительного повышения выхода ДНА при детонации таких составов. Это предположение подтверждено в статье [11], где описаны результаты детонационного синтеза ДНА из прессованных и литых зарядов ТНТ–CL-20 в соотношениях 60 : 40 и 70 : 30 с использованием ϵ -модификации CL-20. Средний выход ДНА по сравнению с аналогичными сплавами ТНТ–гексоген повысился с 9 до 9.9–10.4 %.

Ряд работ посвящен поиску альтернативы ТНТ в качестве источника свободного углерода для образования ДНА. В работе [12] изучен синтез ДНА при детонации соединений ароматического ряда: ТАТВ, HNAV (2,2',4,4',6,6'-гексанитроазабензен), z-TACOT (тетранитродибензотетразапентален) и их смесей с октогеном (НМХ).

Показано, что выход ДНА при детонации рассмотренных индивидуальных ВВ заметно меньше по сравнению со сплавами ТНТ–октоген, а наиболее эффективной рецептурой в плане синтеза является смесь z-TACOT/НМХ (70 : 30), которая обеспечивает заметное повышение выхода ДНА. Смесей других веществ с октогеном дают значительно меньший выход в сравнении со сплавами ТНТ–октоген.

Авторы [13] исследовали процесс детонации ДНП (2,4-динитро-2,4-диазапентана) и его сплавов с гексогеном с целью выяснения различий в синтезе ДНА из ароматических и неароматических ВВ. Показано, что выход конденсированного углерода (КУ), содержание ДНА в КУ и выход ДНА значительно меньше, чем в случае ТНТ.

В качестве источника углерода для образования ДНА в процессе детонации могут выступать не только ВВ, но и органические вещества с отрицательным кислородным балансом. Так, в [14] исследовано образование ДНА в условиях детонации гетерогенных смесевых составов из смеси октогена с жидкой органической добавкой. Используются органические жидкости предельного, непредельного и ароматического рядов. Показано, что для ряда органических веществ содержание ДНА в КУ приближается к аналогичной величине для сплавов ТНТ–гексоген.

Практически все изученные ВВ для детонационного синтеза представляют собой гетерогенные смеси. Средний размер частиц сенсibilизатора в них составляет 150–500 мкм. Для таких сильно неоднородных смесей продукты распада молекул отдельных компонентов не успевают перемешаться в зоне химических реакций до точки Чепмена–Жуге. Оценка толщины слоя диффузионного перемешивания продуктов распада молекул отдельных компонентов дает величину ~0.6 мкм [2]. Малая толщина эффективного диффузионного слоя по сравнению с обычным размером зерна смесевого ВВ позволяет предположить, что при разложении смеси тротил/гексоген имеет место лишь незначительное перемешивание за время химической реакции. Образование продуктов происходит независимо в различных микрообъемах, характеризующихся различным химическим составом, температурой, а возможно, и давлением [15]. В статье [15] исследовано влияние дисперсности октогена в сплавах с тротилом на выход ДНА. Средний размер частиц октогена изменялся в диапазоне от 350 до 6 мкм. Показано, что снижение размера частиц октогена приводит при одинаковых прочих условиях к повы-

ТАБЛИЦА 1

Физико-химические свойства соединений [19, 20]

ВВ	ρ_{\max} , г/см ³	T_m , °С	ΔH_m° , кДж/моль	D , м/с ($\rho_0 = 1.60$)
ТНТ (C ₇ H ₅ N ₃ O ₆)	1.64	80.8	21.9	6900
ДИНА (C ₄ H ₈ N ₄ O ₈)	1.67	52.5	23.6	7730

Примечание. ρ_{\max} – максимальная плотность, T_m – температура плавления, ΔH_m° – стандартная теплота плавления, D – скорость детонации.

шению выхода ДНА с 7.0 до 9.5 %. Содержание ДНА в КУ (C_{ДНА}) при этом возрастает с 50 до 70 %.

Аналогичные результаты получены в [9] при использовании сплавов тротила с Авророй. Показано, что повышение “гомогенности” смесевых гетерогенных ВВ за счет уменьшения размеров структурных неоднородностей способствует заметному росту выхода ДНА. Предельным случаем является смешение ВВ (источника углерода) и ВВ (сенсibilизатора) на молекулярном уровне в виде идеального твердого раствора. Единственный пример синтеза ДНА из гомогенной смеси представлен в работе [10], где приведены результаты экспериментов для сплава ТНТ–ТЭН (90 : 10). По данным [16], растворимость ТЭНа в ТНТ составляет 13 %, и в этом случае образуется не суспензия (как в случае сплавов ТНТ с другими ВВ), а истинный раствор.

Ввиду недостатка информации по синтезу ДНА из гомогенных смесей необходимы дополнительные исследования в этом направлении. Гомогенность композиций можно обеспечить при использовании смесей гетерогенных ВВ, образующих жидкие эвтектические смеси. Известно, что при кристаллизации эвтектик реализуются процессы одновременного роста обеих фаз в жидкостях постоянного состава. Две фазы эвтектики выделяются поочередно при переменном пересыщении жидкости то одним, то другим компонентом. При этом часто образуются очень тонкие структуры кристаллических частиц, отличающиеся плотной упаковкой продуктов затвердевания жидкой эвтектики [17, 18].

В связи с этим в данной работе исследованы свойства сплавов тротила с ди(2-нитроксиэтил)-нитрамин (ДИНА). Выбор последнего обусловлен низкой температурой плавления и высокой взаимной растворимостью компонентов. В табл. 1 приведены некоторые физико-химические характеристики ТНТ и ДИНА, в том числе их скорости детонации. Видно, что ДИНА более мощное ВВ, и этот фактор важен в процессе детонационного синтеза наноалмазов.

Цель работы – исследование синтеза ДНА в гомогенных смесях двух ВВ – ТНТ/ДИНА.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение растворимости и фазового состояния системы ТНТ/ДИНА

Диаграмма состояния бинарной системы ТНТ/ДИНА изучалась методом плавкости, кривые дифференциального термического анализа (ДТА) фиксировались на термоанализаторе STA DTG-60 Shimadzu (Япония) со скоростью нагрева 5 °С/мин. Режимы охлаждения сплавов при построении диаграммы плавкости подбирались опытным путем с учетом процессов кристаллизации избыточного компонента и самой эвтектики.

Процесс растворения ТНТ в ДИНА исследован методом рефрактометрии, который основан на растворении исследуемых компонентов в жидких средах с последующим измерением показателя преломления для растворов заданной концентрации при данной температуре. Концентрация насыщения определяется по калибровочной кривой. Растворимость определяли с использованием термостатированной ячейки, снабженной магнитной мешалкой, с контролем через оптический микроскоп с помощью цифрового рефрактометра Mettler Toledo RM40 (Швейцария) со встроенным термостатом.

Плотность образцов определяли пикнометрически с использованием автопикнометра Mikro-Mate 1320 (США).

Эксперименты по детонационному синтезу

Синтез ДНА проводился с использованием зарядов цилиндрической формы диаметром 38 мм и массой 100 г, которые изготавливались послойной заливкой в изложницу (5–8 слоев). Для заливки использовались как расплавы чистых компонентов, так и смеси ТНТ/ДИНА с содержанием ТНТ 10–80 %, шаг 10 %. Следует отметить особенности поведения различных сплавов в процессе заливки. При высоком содержании тротила в смеси (более 60 %) снижение температуры расплава до 64–66 °С приводит к выделению этого компонента, при этом резко возрастает вязкость и раствор мутнеет. Поэто-

ТАБЛИЦА 2

Результаты экспериментов по синтезу ДНА из сплавов ТНТ-ДИНА (ρ_0 – плотность заряда)

ВВ	$g_{\text{ТНТ}}$	$\rho_0, \text{ г/см}^3$	$V_{\text{КУ}}, \%$	$V_{\text{ДНА}}, \%$	$C_{\text{ДНА}}, \%$
ТНТ	1.0	1.586	18.91±0.38	2.49±0.36	13.2
ТД-80	0.8	1.581	13.70±0.40	2.53±0.32	18.5
ТД-70	0.7	1.579	12.86±0.40	4.03±0.31	31.4
ТД-60	0.6	1.557	10.77±0.25	3.94±0.20	36.6
ТД-50	0.5	1.585	9.05±0.60	3.12±0.33	34.5
ТД-40	0.4	1.604	8.30±0.12	4.03±0.15	48.5
ТД-30	0.3	1.624	7.05±0.17	2.82±0.42	40.0
ТД-20	0.2	1.627	6.12±0.50	2.61±0.20	42.6
ТД-10	0.1	1.613	3.97±0.20	1.70±0.19	42.9
ДИНА	0.0	1.620	3.00±0.08	0.75±0.25	25.0

му заливка зарядов проводилась при несколько большей температуре. Для смесей с содержанием тротила 10–40 % даже при 50 °С расплав остается прозрачным и низковязким, поэтому заливка производилась при этой температуре. Плотность зарядов контролировалась гидростатическим методом. Заряды подрывались во взрывной камере вместимостью 0.175 м³ в среде азота с давлением 0.8 МПа. Иницирование заряда осуществлялось с использованием промежуточного детонатора (бустер, таблетка пресованного гексогена диаметром 20 мм, массой 8 г) и электродетонатора ЭД-8. Конденсированные продукты взрыва собирались и просеивались через сито с размером ячеек 0.315 мм. Полученные продукты анализировались химическими методами на влажность, содержание общего углерода, алмаза и несгорающих примесей. По результатам анализов рассчитаны

выходы конденсированного углерода ($V_{\text{КУ}}$) и алмаза ($V_{\text{ДНА}}$) в процентах от массы ВВ и доля алмазной фазы в КУ ($C_{\text{ДНА}}$) – отношение массы алмаза к массе конденсированного углерода: $C_{\text{ДНА}} = 100V_{\text{ДНА}}/V_{\text{КУ}}, \%$. Полученные величины корректировались с учетом выхода КУ и ДНА из промежуточного детонатора. Каждая экспериментальная точка представляет собой среднее из 2–8 параллельных опытов. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена диаграмма плавкости системы ТНТ/ДИНА, типичная для систем с неограниченной растворимостью в жидком и отсутствием растворимости в твердом состоянии, с температурой плавления эвтектики 38 °С (~64 % ДИНА).

Левая часть кривой ликвидуса характеризует зависимость растворимости ТНТ в ДИНА. Видно (см. рис. 1), что в диапазоне температур 55–75 °С растворимость ТНТ в ДИНА монотонно растет с 42 до 62 %, причем на начальном участке (55–65 °С) растворимость составляет 42–47 % и с повышением температуры до 75 °С заметно возрастает, достигая 62 %.

Энтальпия растворения ТНТ в ДИНА (ΔH_d) определена с использованием уравнения Шредера–Ле-Шателье [21, 22]:

$$\ln(N_m) = -\frac{\Delta H_d}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m^{\text{ТНТ}}} \right) \quad (1)$$

где N_m – мольная концентрация ТНТ в насыщенном растворе при температуре T ; $T_m^{\text{ТНТ}}$ –

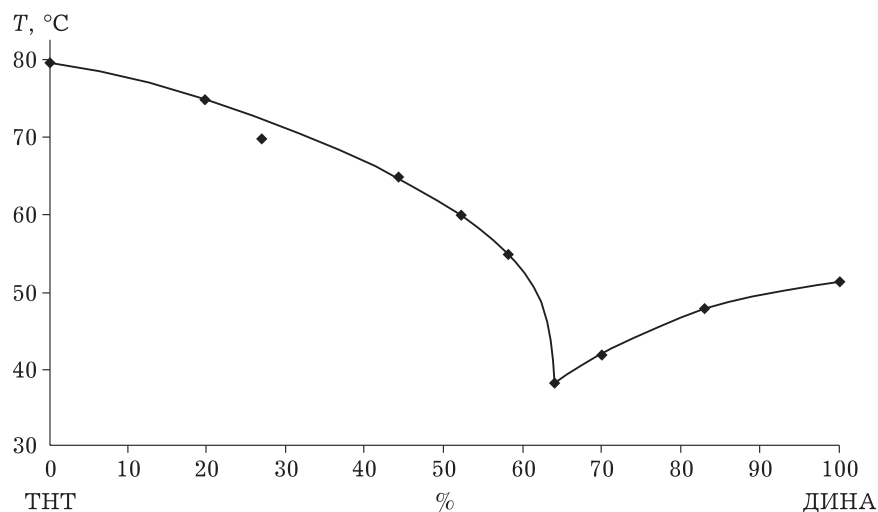


Рис. 1. Диаграмма плавкости системы ТНТ/ДИНА.

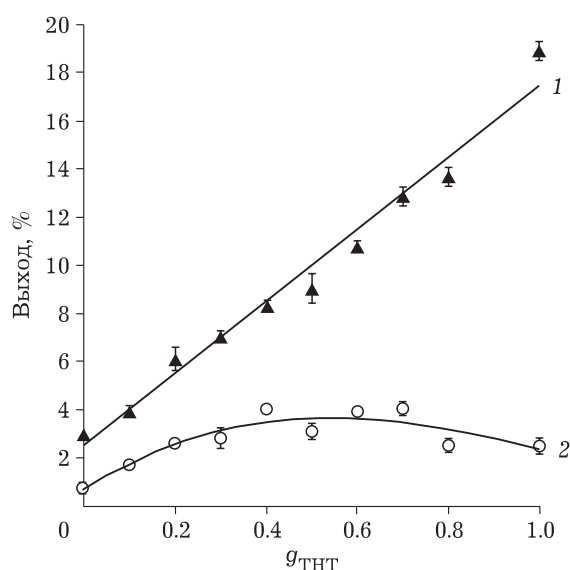


Рис. 2. Зависимости выходов КУ (1) и ДНА (2) от содержания тротила в сплавах ТНТ–ДИНА (горизонтальными рисками обозначены среднеквадратичные отклонения).

температура плавления чистого ТНТ; R – универсальная газовая постоянная.

Определенная по уравнению (1) энтальпия растворения ТНТ в ДИНА составляет 29.9 кДж/моль. Полученные результаты согласуются с данными [23], в которой определен состав эвтектической смеси: ТНТ/ДИНА = 37 : 63 %.

Значение энтальпии растворения ТНТ в ДИНА заметно превышает энтальпию плавления тротила (на 8 кДж/моль), что свидетельствует о взаимодействии компонентов в данной системе. Растворение ТНТ в ДИНА сопровождается поглощением теплоты и некоторым увеличением объема [24], плотность системы несколько меньше аддитивной (расчетная аддитивная плотность 1.627 г/см³; экспериментальная плотность 1.620 г/см³).

Анализ фазовой диаграммы двухкомпонентной системы ТНТ/ДИНА (см. рис. 1), а также данные работы [23] показывают возможность изготовления зарядов с существенно более однородной внутренней структурой, чем у зарядов с высокодисперсными мощными ВВ.

На рис. 2 представлены зависимости выходов КУ и ДНА от состава сплавов ТНТ–ДИНА. Зависимость выхода КУ от состава смеси хорошо описывается линейной функцией (коэффициент корреляции 0.977):

$$V_{\text{КУ}} = a + bg_{\text{ТНТ}}$$

где $g_{\text{ТНТ}}$ – массовая доля ТНТ в смеси. Найденные по методу наименьших квадратов коэффициенты равны: $a = 2.50$, $b = 14.94$.

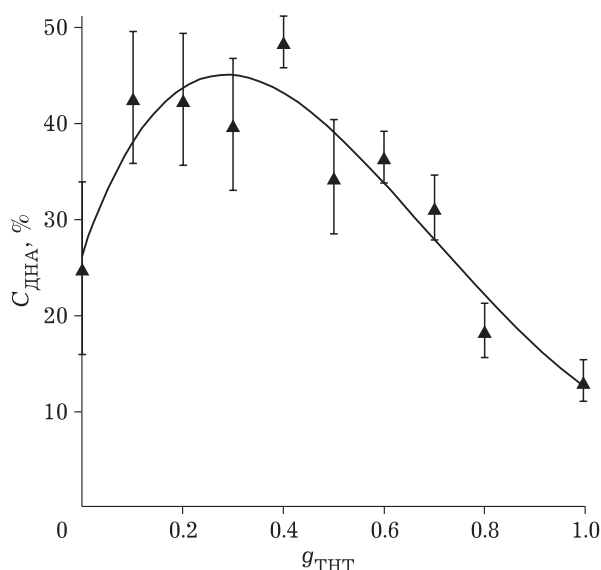


Рис. 3. Зависимость доли ДНА в КУ от содержания тротила в сплавах ТНТ–ДИНА.

Зависимость выхода ДНА от состава сплавов ТНТ–ДИНА имеет экстремальный характер. При повышении содержания ТНТ в смеси до ~40 % выход ДНА достигает максимума; при дальнейшем повышении до ~70 % выход сначала практически не меняется, а затем снижается и становится сопоставим с выходом из чистого тротила.

На рис. 3 представлена зависимость доли (C) ДНА в КУ от состава исследованных сплавов, которая также имеет максимум. Наибольшее значение $C_{\text{ДНА}}$ наблюдается в диапазоне концентраций ТНТ 10–40 %. При больших содержаниях ТНТ и для чистой ДИНА доля ДНА в КУ заметно ниже.

Полученные результаты по выходу ДНА и его доле в КУ показывают, что наиболее эффективным с точки зрения синтеза наноалмазной фазы углерода является сплав ТНТ–ДИНА с содержанием компонентов, близким к эвтектическому (40/60). Он характеризуется наиболее однородным распределением компонентов (практически на молекулярном уровне).

Следует отметить, что выход ДНА из сплавов ТНТ–ДИНА значительно ниже, чем для сплавов тротила с гексогеном и октогеном, где он может превышать 9 % [3, 15]. Это связано с существенно меньшей мощностью ДИНА по сравнению с упомянутыми ВВ. В табл. 3 приведены расчетные детонационные параметры и экспериментальные данные по содержанию ДНА в КУ для смесей тротила с несколькими более мощными ВВ –

ТАБЛИЦА 3

Расчетные и экспериментальные взрывчатые характеристики сплавов тротила с некоторыми ВВ

ВВ	КБ, %	ρ_0 , г/см ³	P, кбар	T, К	C _{ДНА} , %
ТНТ–ДИНА (40 : 60)	–45.6	1.604	224	3603	48.5
ТНТ–ТЭН (40 : 60)	–35.7	1.676	249	3750	65.0
ТНТ–гексоген (40 : 60)	–42.6	1.697	261	3695	67.1
ТНТ–октоген (40 : 60)	–42.6	1.744	276	3663	67.2

Примечание. КБ – кислородный баланс ВВ; P, T – давление и температура в точке Чепмена–Жуге соответственно.

сенсibilizаторами (содержание ТНТ во всех смесях составляет 40 %). Расчеты выполнены с использованием уравнения состояния Беккера–Кистянского–Вильсона [25] в предположении образования алмаза в продуктах. Для алмаза использовалось уравнение состояния Коуэна с параметрами, предложенными в работе [26].

Представленные данные (см. табл. 3) показывают, что детонационные параметры, в первую очередь давление детонации, оказывают определяющее влияние на образование алмазной фазы в продуктах детонации. Содержание ДНА в КУ возрастает с ростом давления, достигая максимального значения при 250–260 кбар, и при дальнейшем повышении давления остается практически на этом уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы процессы растворения ТНТ в ДИНА и синтеза ДНА из этой смеси. Определены температурная зависимость растворимости ТНТ в ДИНА в диапазоне температур 55–75 °С и теплота растворения, значения которой на 8 кДж/моль превышают теплоту плавления тротила, что свидетельствует о взаимодействии компонентов.

Определены зависимости выхода КУ и ДНА от состава смеси. Выявлено, что максимальный выход ДНА наблюдается в случае смесей, близких к эвтектической.

Содержание ДНА в КУ растет с повышением давления, достигая максимального значения при 260 кбар, и при дальнейшем увеличении давления практически не изменяется.

Работа выполнена в рамках проекта V.49.1.3 (№ 0385-2019-0011) с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 3. С. 123–125.
- 2 Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 117–126.
- 3 Козырев Н. В., Голубева Е. С. Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов из смеси тротила с гексогеном, октогеном и тэном // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 119–123.
- 4 Xu K., Jin Z., Wei F., Jiang T. Preparation of ultrafine diamonds by explosive detonation method // Chinese Journal of Energetic Materials. 1993. Vol. 1, No. 3. P. 19–21.
- 5 Chen Q., Ma F., Chen P., Yun S., Huang F. Effect of different preservative substances on the formation of condensed carbon in detonation // Chinese Journal of High Pressure Physics. 1998. Vol. 12, No. 2. P. 129–133.
- 6 Liu Y., Wang J., Yu Y. Effect of protective medium on the yield of nanometer diamond // Chinese Journal of Energetic Materials. 2005. Vol. 13, No. 5. P. 327–329.
- 7 Greiner N. R., Phillips D. S., Johnson J. D., Volk F. Diamonds in detonation soot // Nature. 1988. Vol. 333, No. 6172. P. 440–442.
- 8 Forbes J., Davis J., Wong C. Detonation synthesis of nanosize materials // MRS Proceeding. 1996. Vol. 418. P. 439–444.
- 9 Козырев Н. В., Сысолятин С. В., Сакович Г. В. Синтез ультрадисперсных алмазов из сплавов тротила с полициклическими нитраминами // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 131–134.
- 10 Козырев Н. В. Применение метода меченых атомов для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 6. С. 92–98.
- 11 Казутин М. В., Козырев Н. В., Петров Е. А., Комарова М. В. Синтез наноалмаза при детонации зарядов ТНТ/CL-20 // Ползунов. вестн. 2016. Т. 1, № 4. С. 40–44.
- 12 Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Сагдеев Ф. А. Синтез алмаза при детонации ароматических нитросоединений // Сб. докл. V Всесоюз. совещ. по детонации. Т. 1. Красноярск. 1991. С. 27–30.
- 13 Першин С. В., Петров Е. А., Цаплин Д. Н. Влияние структуры молекулы ВВ на скорость образования и свойства ультрадисперсных алмазов // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 102–106.
- 14 Мальков И. Ю. Образование ультрадисперсной алмазной фазы углерода в условиях детонации гетерогенных смесевых составов // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 136–140.

- 15 Козырев Н. В., Ларионов Б. В., Сакович Г. В. Влияние дисперсности октогена на синтез наноалмазов в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 2. С. 79–83.
- 16 Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л.: Химия, 1973.
- 17 Бочвар А. А. Исследование механизма и кинетики кристаллизации сплавов эвтектического типа. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 46 с.
- 18 Равич Г. Б., Кузнецова Н. П. и др. Фазовые равновесия и физические свойства полинитросоединений (микрофазовый анализ). М.: Машиностроение, 1969. 82 с.
- 19 Meyer R., Kohler J., Horburg A. Explosives. 6ed. Wiley-VCH, 2007.
- 20 Wright G. F., Chute W. J. Nitramines and their preparation // US Pat. No. 2461582, 1949.
- 21 Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1975.
- 22 Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. Основы физико-химического анализа. М.: Наука, 1976.
- 23 Kozak G. D., Kondrikov B. N., Lin Z. Detonation of TNT-DINA and DNT-PETN cast charges // 31st Int. Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2000. P. 78.
- 24 Moelwyn-Hughes E. A. Physical Chemistry. L.-N.-Y.-Paris: Pergamon Press, 1961.
- 25 Kozyrev N. V. Reparametrization of the BKW equation of state for CHNO explosives which release no condensed carbon upon detonation // Central European Journal of Energetic Materials. 2015. Vol. 12, No. 4. P. 651–669.
- 26 Губин С. А., Одинцов В. В., Пелекин В. И., Сергеев С. С. Влияние формы и размера кристаллов алмаза и графита на фазовое равновесие углерода и параметры детонации // Хим. физика. 1990. Т. 9, № 3. С. 401–417.