

06

Влияние слабого магнитного поля на чувствительность порошкообразного аммината перхлората кобальта различной дисперсности к воздействию сильноточного электронного пучка наносекундной длительности

© Г.Г. Савенков,^{1,2} В.А. Морозов,³ М.А. Илюшин,¹ В.М. Кац³

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 9 декабря 2019 г.

Принято к публикации 28 января 2020 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию влияния слабого магнитного поля на чувствительность порошкообразного аммината перхлората кобальта к воздействию сильноточного электронного пучка (СЭП) наносекундной длительности. В экспериментах применялся порошок аммината перхлората кобальта двух типов дисперсности: среднedisперсный и мелкодисперсный. Установлено, что на чувствительность к воздействию СЭП влияет как слабое магнитное поле, так и дисперсность порошка.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, магнитное поле, амминат перхлората кобальта, взрывчатое превращение.

DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49542.392-19

Введение

Исследование возможностей целенаправленного регулирования чувствительности энергонасыщенных материалов (ЭНМ) к внешним воздействиям является одной из фундаментальных проблем физики горения и взрыва [1]. При этом особый интерес вызывает изучение проблемы влияния на взрывную чувствительность ЭНМ к импульсному воздействию сильноточного электронного пучка (СЭП) после их стимулированной обработки в различных физических полях. В первую очередь это связано с поиском возможностей снижения энергетических параметров импульсного электронного пучка. Как следствие, это может привести к снижению массогабаритных характеристик генераторов СЭП, что приведет к инженерному решению проблемы практического использования таких генераторов в различных взрывных устройствах.

В работах [2–5] были проведены исследования влияния на взрывную и тепловую чувствительность энергонасыщенных материалов (смесового состава на основе нитроглицерина и нитроцеллюлозы, состава на основе пикрата калия, аммината перхлората кобальта и некоторых других) радиационного облучения β - и γ -частицами. Было показано, что предварительное облучение потоками указанных частиц приводит к существенному увеличению их чувствительности к воздействию СЭП наносекундной длительности. Такое повышение чувствитель-

ности под действием ионизирующего излучения может быть связано с генерацией в ЭНМ реакционноспособных частиц и изменением их микроструктуры.

В ряде работ [6] и др. предполагается, что одним из механизмов возбуждения в энергонасыщенных материалах быстрых экзотермических реакций (взрывчатых превращений) является дислокационный механизм распада ЭНМ, который собственно и определяет процесс иницирования. По мнению авторов, суть дислокационного механизма состоит в следующем. В ряде случаев при внешних воздействиях (авторы [6], например, говорят о пластической деформации кристалла ЭНМ) происходит образование и движение дислокаций. Дислокации при движении генерируют радикалы. Радикалы запускают процесс распада ЭНМ. Чем выше интенсивность внешнего воздействия (например, степень пластической деформации), тем больше количество (или плотность) дислокаций и их подвижность, а значит, и больше образуется радикалов и тем быстрее протекает распад ЭНМ. Чем быстрее протекает распад, тем выше чувствительность данного ЭНМ к различному виду воздействия.

В настоящее время известно [7], что слабое (магнитная индукция $B < 1$ Т) магнитное поле стимулирует подвижность дислокаций и существенно влияет на различные физико-механические и структурно-чувствительные характеристики немагнитных материалов. Поэтому цель настоящей работы состоит в оценке влияния предварительной обработки в слабом магнитном поле (СМП)

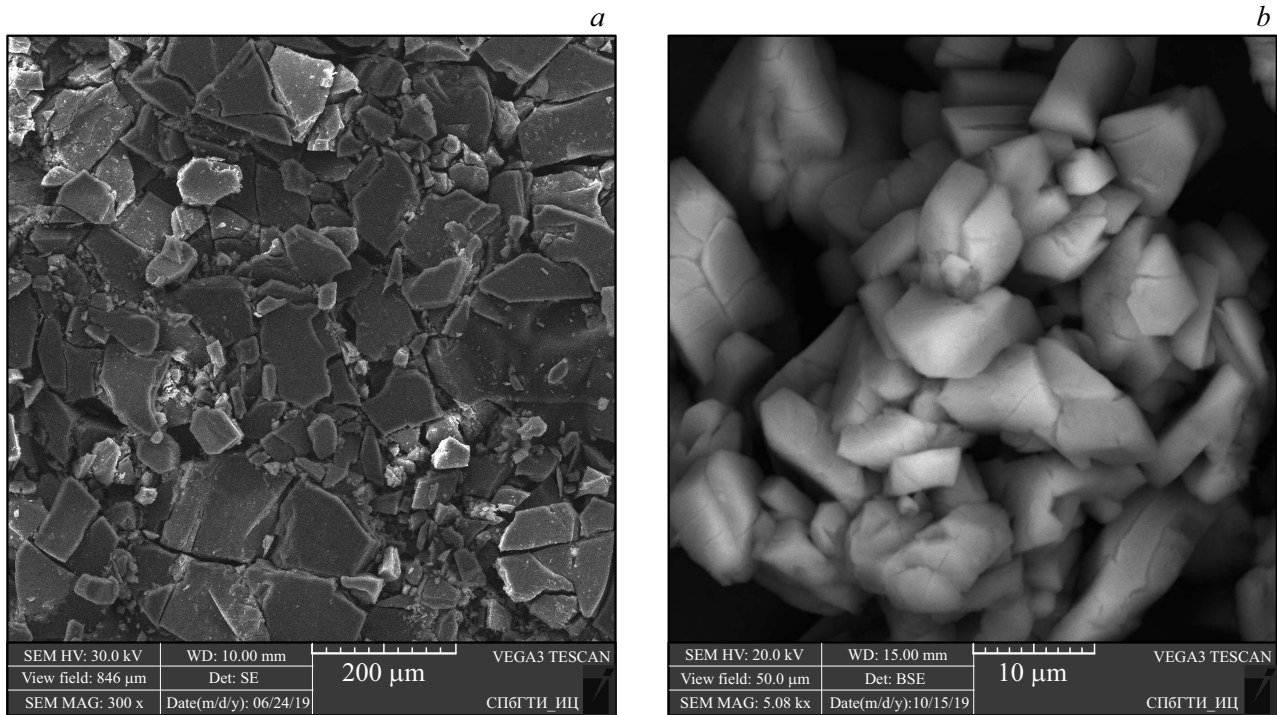


Рис. 1. Исходное состояние аммината перхлората кобальта: *a* — среднедисперсный NCP; *b* — мелкодисперсный NCP.

энергонасыщенного материала на его чувствительность к импульсному облучению сильноточным электронным пучком наносекундной длительности.

Энергонасыщенный материал и методика эксперимента

В качестве исследуемого энергонасыщенного материала был выбран амминат перхлората кобальта (NCP), который был исследован на восприимчивость к СЭП, в том числе после предварительного ионизирующего облучения и в сочетании с наноразмерными добавками различных форм углерода в работах [4,8,9]. В экспериментах применялся порошок NCP с двумя типами дисперсности: 1) среднедисперсный — со средним размером частиц $\sim 72 \mu\text{m}$ (рис. 1, *a*); 2) мелкодисперсный со средним размером частиц $\sim 10 \mu\text{m}$ (рис. 1, *b*). Далее они будут обозначаться NCP_I и NCP_{II} соответственно. Отметим, что порошок NCP_{II} по дисперсности близок к порошку, который применялся в экспериментах работы [4,5,8] (средний размер его частиц был $\sim 5 \mu\text{m}$).

Порошок NCP (каждого вида дисперсности) запрессовывали в латунные колпачки с внутренним диаметром 4.5 mm на высоту 2.3 mm. Масса каждой запрессованной в колпачок навески порошка NCP составляла 50 mg, плотность — 1.42 g/cm^3 . Учитывая массу и габариты запрессованного вещества можно было ожидать, что потенциальные взрывчатые превращения в образцах могут происходить либо в режиме медленного послыонного горения, либо в режиме дефлаграции.

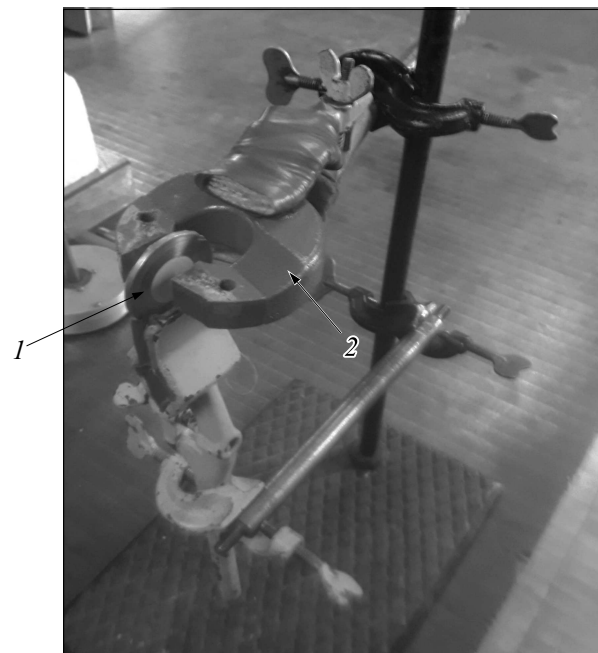


Рис. 2. Схема облучения образца в слабом магнитном поле: 1 — образец, 2 — постоянный магнит.

Схема обработки образца в слабом магнитном поле постоянного магнита с индукцией 45 mT приведена на рис. 2. Измерения индукции проводили с помощью тесламетра ЭМ 4305 (предел допускаемой погрешности

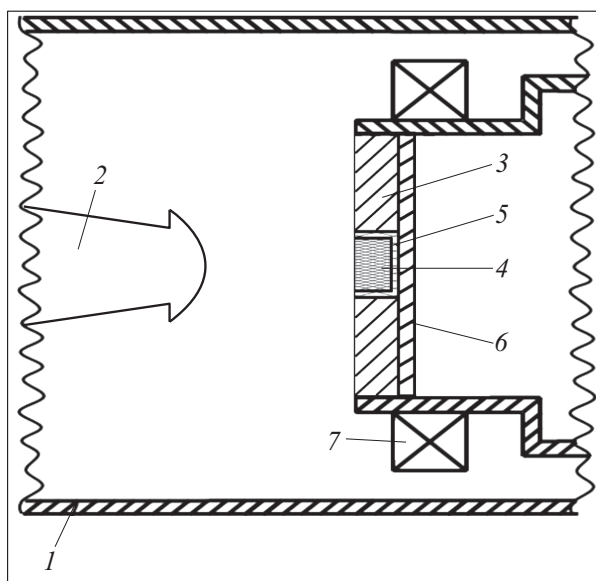


Рис. 3. Экспериментальная схема облучения пучком электронов образца: 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — стальное кольцо, 4 — ЭНМ, 5 — колпачок, 6 — диск.

в диапазоне измерений 0–500 мТ составляет ± 2.5 мТ). Облучение в магнитном поле проводилось в течение 45 мин. После облучения образец устанавливался в стальное кольцо и помещался в вакуум-камеру электронного ускорителя.

Схема воздействия на образец электронного пучка полностью аналогична схеме, приведенной в работе [8] (рис. 3).

В качестве источника генерации сильноточного электронного пучка использовался электронный ускоритель ГКВИ — 300 [10]. Колпачок с исследуемым ЭНМ устанавливался в стальное кольцо с внешним диаметром — 30 мм. Стальное кольцо 3, в котором находился колпачок 5 с ЭНМ 4, устанавливалось на стальной диск 6 толщиной 2.2–2.5 мм (служил в качестве „диска-свидетеля“), на котором оставался или не оставался отпечаток от колпачка, после того как в образце происходили некие взрывчатые превращения.

Длительность импульса напряжения на его полувысоте составляла 20–40 ns, средняя номинальная энергия электронов в пучке — 250 keV, расстояние между катодом и образцом составляло либо 4 мм, либо 5.5 мм, диаметр пучка — 8 мм. Все эксперименты проводились с отсечкой катодного факела [10] и собственного вихревого магнитного поля пучка путем установки на кольцо 3 стальной фольги толщиной 15 μ m. Можно полагать, что установка стальной фольги указанной толщины приводит к уменьшению энергии пучка на $\sim 40\%$ от номинальной [5]. Время после обработки образца в магнитном поле и до воздействия на него электронного пучка составляло ~ 1 h.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты экспериментов приведены в таблице. На рис. 4, а представлен вид отпечатка (серия экспериментов 1) от доньшка колпачка после взрывчатого превращения NCP I на диске-свидетеле. На рис. 4, б представлена тыльная сторона диска с выдавленным конусом металла (отпечаток и конус указаны стрелками).

Прежде всего, анализ результатов, приведенных в таблице и в совокупности с результатами работ [4,5,8], показал, что, чем ниже дисперсность порошка ЭНМ, тем выше восприимчивость NCP к воздействию сильноточного электронного пучка.

Из результатов, представленных в таблице, видно, что предварительная обработка вещества в СМП оказала существенное влияние как на чувствительность к воздействию СЭП, так и на энергетические свойства аммината перхлората кобальта. Для NCP I глубина отпечатка на 30–40% превосходит глубину отпечатка колпачка с необработанным в магнитном поле веществом при воздействии на него СЭП с большей энергией и, практически, в 2 раза превосходит глубину отпечатка при действии СЭП с той же энергией.

Для NCP II обработка в магнитном поле не только восстановила чувствительность к воздействию СЭП со слабой энергетикой, но и восстановила энергетический режим взрывчатого превращения (по всей видимости — режим дефлаграции).

С чем же может быть связано резкое увеличение чувствительности и глубины отпечатка на диске-свидетеле? Прежде всего, необходимо отметить, что исследуемое вещество, исходя из его поэлементного состава, должно с большой долей вероятности относиться к классу парамагнетиков.

Результаты экспериментов по иницированию аммината перхлората кобальта, предварительно обработанного в слабом магнитном поле

№	Тип порошка NCP	Доля энергии, %	Наличие обработки в магнитном поле	Глубина отпечатка, мм
1	NCP I	60	–	0.35–0.45
2		50	–	0.25–0.35
3		50	+	0.5–0.6
4	NCP II	60	–	0.2–0.25
5		50	–	–
6		50	+	0.2–0.25

Примечание. 1. На каждый вид испытания приходилась серия из 3-х экспериментов; 2. В 5-ом виде испытаний возбудить взрывчатые превращения не удалось.

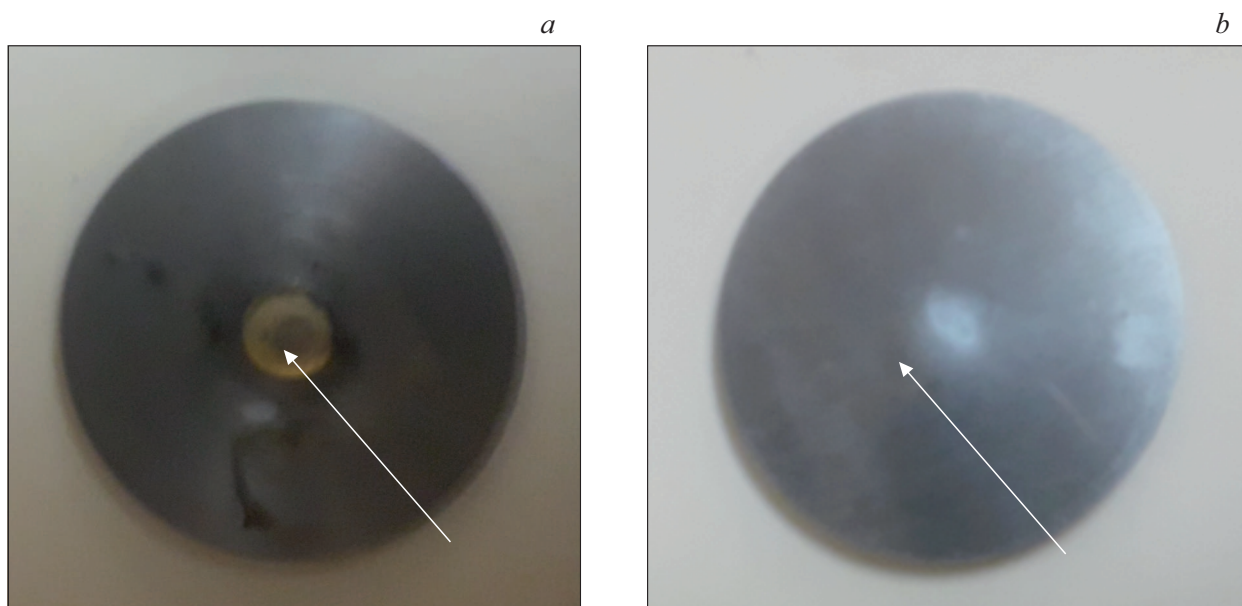


Рис. 4. Отпечаток на фронтальной поверхности диска-свидетеля (*a*) и выдавленный конус металла на тыльной поверхности диска (указан стрелкой) (*b*).

Это связано с тем, что кобальт является чистым ферромагнетиком и обладает большим магнитным дипольным моментом атома, подавляющим диамагнитные свойства вещества [11]. И, наконец, хорошо известно, что соли элементов семейства железа (к которому относится кобальт) обладают хорошо развитыми парамагнитными свойствами [12]. Кроме того, в процессе распада (который может начаться под действием СМП) исследуемого комплекса происходит частичное восстановление Co^{+3} и образуется Co_3O_4 [13], который может рассматриваться как смешанный окисел $\text{CoO}\cdot\text{Co}_2\text{O}_3$ или как соль кобальта(III) кобальта(II) $\text{Co}[\text{Co}_2\text{O}_4]$.

Таким образом, априори, в исследуемом нами веществе присутствует достаточно большое количество парамагнитных объектов (локализованных электронов, дырок, триплетных экситонов, ион-радикалов), способных вступать в обменное взаимодействие [7]. Под действием слабого магнитного поля, которому подвергается исследуемое вещество, в нем происходит образование радикальных пар (РП).

Как известно [10], СЭП обладает и механическим полем, которое воздействует на вещество суммарным давлением, состоящим из давления, развиваемого за счет механического импульса электронов, и давления, создаваемого ударной волной, возникающей при действии на образец электронного пучка. В нашем случае суммарная величина давления не превосходит 200–300 МПа, что сопоставимо с давлением прессования взрывчатых составов в оболочки средств инициирования [14]. Тем не менее такое давление приводит к пластической деформации (ПД) (ее величина может достигать с учетом низкой плотности запрессованного в колпачок НСР достаточно высоких значений) вещества в колпачке. В свою оче-

редь, ПД вызывает рост концентрации парамагнитных центров, что приводит к увеличению вероятности интеркомбинационных переходов (ИКП) между синглетными (*S*) и триплетными (*T*) состояниями радикальных пар. Полагают [15], что при воздействии СМП увеличивается заселенность *T*-состояний РП, обладающих значительно меньшими энергиями разрыва. Термическое действие электронного пучка стимулирует обменные реакции между РП в *S*- и *T*-состояниях, которые запускают реакции разложения и в конечном итоге это приводит к запуску реакций взрывчатых превращений. Чем больше концентрация РП, тем выше вероятность ИКП и возникновения реакций ВП и соответственно выше чувствительность ЭНМ к внешнему воздействию (в нашем случае к воздействию СЭП).

Увеличение глубины отпечатка можно объяснить снижением длины участка перехода горение–взрывное горение и более высокой скоростью нарастания давления на участке взрывного горения.

Заключение и выводы

Авторы не претендуют на полное объяснение обнаруженных в рамках настоящей работы эффектов как в силу их сложности, так и вследствие недостатка научных теорий влияния СМП на немагнитные материалы в целом. Возможно, здесь потребуется привлечение теории материалов с эффектом памяти, но не формы, а магнитного поля. Не ясно также как долго сохраняются свойства вещества после его обработки в слабом магнитном поле. Тем не менее на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Чувствительность порошкообразного аммината перхлората кобальта к воздействию СЭП связана с его дисперсностью: чем ниже дисперсность порошка, тем выше восприимчивость НСР к воздействию сильноточного электронного пучка.

2. Предварительная обработка энергонасыщенного материала (аммината перхлората кобальта) в СМП приводит к увеличению его чувствительности к воздействию СЭП наносекундной длительности.

3. Одновременно с увеличением чувствительности НСР происходит увеличение давления в волне дефлаграционного давления, что может быть связано с сокращением участка перехода от послыйного горения к дефлаграционному горению.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Физика взрыва. Т. 1. / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
- [2] Коптелов А.А., Милёхин Ю.М. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 6. С. 69–74.
- [3] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Мазур А.С., Лукин А.А. // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 9. С. 33–36.
- [4] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Персинен А.А., Оськин И.А., Брагин В.А., Лукин А.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 17. С. 28–33.
- [5] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Илюшин М.А., Кац М.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1050–1056.
- [6] Клименко В.Ю. // International Conference „Shock Waves in Condensed Matter“, Saint-Petersburg–Novgorod, 2010. Сборник трудов конференции. 2010. С. 145–150.
- [7] Головин Ю.И. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 769–803.
- [8] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Илюшин М.А., Оськин И.А., Брагин В.А., Козлов А.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 11. С. 1701–1706.
- [9] Савенков Г.Г., Морозов В.А., Илюшин М.А., Кац В.М. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1050–1056.
- [10] Морозов В.А., Савенков Г.Г., Брагин В.А., Лукин А.А., Кац В.М. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5. С. 129–134.
- [11] Мирдель Г. Электрофизика. М.: Мир, 1972. 608 с.
- [12] Зейтц Ф. Современная теория твердого тела. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. 736 с.
- [13] Тверьянович Ю.С., Тверьянович А.С., Илюшин М.А., Аверьянов А.О., Смирнов А.В., Шугалей И.В. // ЖОХ. 2017. Т. 87. Вып. 11. С. 1860–1864. [Tverjanovich Yu.S., Tverjanovich A.S., Pyushin M.A., Aver'yanov A.O., Smirnov A.V., Shugalei I.V. // Rus. J. Gen. Chem. 2017. Vol. 87. N 11. P. 2600–2604.]
- [14] Карпов П.П. Средства инициирования. М.: Оборонгиз, 1945. 272 с.
- [15] Молоцкий М.И. // ФТТ. 1991. Т. 33. Вып. 10. С. 3112–3114.