УДК 53.044

СКОРОСТЬ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СМЕСИ МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ

В. В. Якушев 1 , С. Ю. Ананьев 2 , А. В. Уткин 1 , А. Н. Жуков 1 , А. Ю. Долгобородов 2,3

Измерена скорость звука за фронтом ударной волны в прессованных образцах из микро- и нанодисперсной смесей порошков никеля и алюминия при давлениях 10, 30 и 60 ГПа с целью проверки возможности протекания реакции с образованием алюминида никеля в субмикросекундном диапазоне времени. Показано, что в области давления до 60 ГПа скорость звука в образцах из нанодисперсной смеси выше, чем в образцах из микродисперсной смеси. Причем при приближении к 60 ГПа скорости звука в обеих смесях с учетом погрешности практически выравниваются, что связано с плавлением образцов. На основании полученных данных сделан вывод об отсутствии заметного протекания реакции Ni + Al за время менее 1 мкс.

Ключевые слова: реакционные (энергетические) материалы, наноматериалы, высокое давление, ударно-волновое инициирование реакций, ударная адиабата, скорость звука, детонация.

 ${\rm DOI~10.15372/FGV20190615}$

ВВЕДЕНИЕ

Система Ni + Al относится к так называемым реакционным материалам, которые представляют собой порошковые смеси, способные реагировать с большим тепловым эффектом без выделения или с незначительным выделением газообразных продуктов (термитные смеси, смеси для получения интерметаллидов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и др.). Распространение ударных волн в таких смесях активирует процессы, которые резко ускоряют протекание химических реакций на поверхности частиц: взаимное перемещение и перемешивание компонентов, сильный разогрев в местах контакта, разрушение исходной структуры частиц и др. В результате на контактной поверхности практически сразу начинается механохимическое взаимодействие с энерговыделением. Результаты исследования ударного сжатия эквиатомных смесей Ni + Al в плоских и цилиндрических ампулах сохранения показали полное реагирование компонентов с образованием интерметаллида NiAl [1, 2]. Однако эти эксперименты не позволяют сделать вывод о глубине протекания реакции за время нахождения вещества в ударно-сжатом состоянии (\approx 1 мкс). В частности, предполагается, что основное энерговыделение в объеме начинается намного позже момента сжатия — через десятки и сотни миллисекунд [3].

Традиционные подходы к обнаружению реакции в смесевых образцах за фронтом ударной волны [3-7], в частности фиксирование отклонения экспериментальной ударной адиабаты от расчетной для смеси без учета реакции [5], не позволили ответить на вопрос о глубине протекания реакции, поскольку эффект сопоставим с экспериментальной погрешностью. Предпринятая нами попытка зафиксировать наличие реакции или ее отсутствие в смеси Ni + Al посредством определения ударных адиабат для образцов из микро- и нанодисперсной смесей, без привлечения расчетной ударной адиабаты, также показала несущественное отклонение [4]. Таким образом, для обнаружения реакции в таких системах требуются методы, обладающие более высокой чувствительностью к образованию нового вещества (продукта реакции). В настоящей работе предложено детектировать реакцию в образцах

 $^{^1}$ Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, yakushev@ficp.ac.ru

²Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва

³Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № I.13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

[©] Якушев В. В., Ананьев С. Ю., Уткин А. В., Жуков А. Н., Долгобородов А. Ю., 2019.

 h_f , Вид Номер h, p, $\Gamma\Pi a$ v_f , $\kappa M/c$ ε , % u, $\kappa M/c$ D, $\kappa M/c$ c, $\kappa M/c$ Γ/cm^3 смеси опыта MM2.96 218 3.89 24.7Нано 9.6 ± 0.4 0.82 ± 0.03 3.05 ± 0.03 6.06 ± 0.52 4.42 3.90 24.4 219 1.40 ± 0.04 4 254 3.00 3.83 25.8 9.4 ± 0.4 Микро 0.83 ± 0.03 2.93 ± 0.03 3.93 ± 0.22 255 6.00 3.82 26.0 229 3.98 3.86 25.3Нано 32.1 ± 1.4 1.71 ± 0.07 4.93 ± 0.05 7.39 ± 0.52 334 27.3 8.20 3.75 3.30 ± 0.10 5 3.837 25.7 314 3.98 Микро 31.7 ± 1.3 1.73 ± 0.07 4.83 ± 0.05 5.44 ± 0.40 257 8.06 3.800 26.43.82 329 2.05 26.1 Нано 62.6 ± 2.6 2.43 ± 0.10 6.57 ± 0.06 8.10 ± 0.79 330 26.3 3.60 3.81 2 5.10 ± 0.10 331 2.04 3.81 26.3

 ${\rm Taf}_{\tt Лица} \ 1$ Характеристики образцов и параметры ударного сжатия

Примечания. v_f — скорость ударника, h_f — толщина ударника, h — толщина образца, $\varepsilon=(\rho_0-\rho)/\rho_0$ — пористость образца, ρ — плотность экспериментального образца, ρ_0 — теоретическая плотность сплошного образца, p — давление, u — массовая скорость, D — скорость ударной волны, c — скорость звука, определенная по результатам экспериментов. Ошибки определения толщины $\Delta h=0.01$ мм и плотности $\Delta \rho=0.02$ г/см 3 .

25.9

 61.4 ± 2.6

смеси Ni + Al с помощью определения зависимостей скорости звука от давления в ударносжатых смесях с существенно различающимися по дисперсности компонентами (микро- и наноразмерные частицы). Предполагалось, что за счет большей поверхности контакта реагентов повышенная реакционная способность наноразмерной смеси обеспечит более глубокое протекание реакции. Поскольку скорость звука весьма чувствительна к физико-химическим процессам [8–11], происходящим в веществе, ожидается, что сравнение относительного положения полученных зависимостей скорости звука от давления позволит убедительно показать наличие реакции или ее отсутствие.

Микро

332

3.58

3.83

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы изготавливались из эквиатомной смеси порошков Al и Ni (Al/Ni 31.5/68.5 по массе) различной дисперсности (микро и нано) путем прессования в таблетки диаметром $30 \div 40$ мм и толщиной $2.0 \div 8.2$ мм с усилием 6.5 т/см 2 для микродисперсной смеси и 8.5 т/см 2 для нанодисперсной смеси. Плотность образцов составляла около 75 % от мак-

симальной теоретической. Смеси перед прессованием проходили механическую активацию.

 6.33 ± 0.06

 7.05 ± 0.78

 2.47 ± 0.10

Для приготовления смесей с микронными размерами частиц использовались промышленные порошки: Ni — порошок ПНК-1, Al — пудра ПП-2л. Смешивание порошков и механоактивацию (в течение 7 мин) полученной смеси из микронных частиц проводили в ИХФ РАН (Москва) в вибрационной мельнице конструкции Аронова. Наночастицы Ni и Al получали в ИНЭПХФ РАН (Москва) на установке МИГЕН методом Гена — Миллера [12]. Смешивание нанопорошков (≈ 5 мин) и механоактивацию нанодисперсных смесей (≈ 5 мин) выполняли в планетарной мельнице «Активатор-2SL» (ЗАО «Активатор», Новосибирск). Характеристики образцов и параметры ударного сжатия приведены в табл. 1.

Ударные волны в образцах создавались с использованием аттестованных взрывных метательных устройств по схеме, представленной на рис. 1. Взрывной генератор 1 диаметром 100 мм формировал плоскую ударную волну в заряде взрывчатого вещества 2 диаметром 80 или 120 мм из флегматизированного гексогена. Продукты взрыва вещества разгоняли алю-

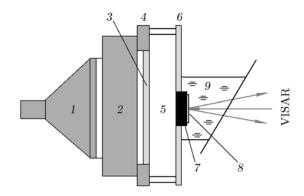


Рис. 1. Экспериментальная сборка:

1 — плосковолновый генератор ударной волны, 2 — заряд взрывчатого вещества, 3 — алюминиевый ударник, 4 — стальное кольцо, 5 — база разгона ударника, 6 — алюминиевый экран, 7 — образец, 8 — алюминиевая фольга, 9 — водяное окно

миниевую пластину-ударник 3 из сплава АД-1, которая на заданном расстоянии 5 достигала требуемой скорости. Воздушный зазор между зарядом и ударником служил для предотвращения откольного разрушения ударника. Разогнанный ударник сталкивался с образцом 7 и генерировал в нем ударную волну. Ударная волна распространялась по образцу и выходила на границу с водяным окном 9. При этом граница вместе с наклеенной на поверхность образца тонкой алюминиевой фольгой 8 начинала движение, а ее скорость измерялась одноканальным лазерным интерферометром VISAR. Варырование параметров нагружения осуществлялось за счет изменения массы заряда взрывчатого вещества и толщины ударника. Использовалось три варианта взрывных метательных устройств, позволяющих разгонять ударники толщиной 4, 5, 2 мм и диаметром 120, 90 и 70 мм до скоростей 1.4 км/c (10 $\Gamma\Pi a$), $3.3~{\rm km/c}~(30~{\rm \Gamma \Pi a})$ и $5.1~{\rm km/c}~(60~{\rm \Gamma \Pi a})$ соответственно. В метательном устройстве, разгоняющем ударник до скорости 1.4 км/с заряд отсутствовал и разгон ударника осуществлялся непосредственно генератором. Зондирование поверхности образца проводилось излучением твердотельного лазера Verdi с длиной волны 532 нм и мощностью до 1 Вт. Отраженное излучение регистрировалось фотоэлектронными умножителями VALYN с временем нарастания фронта сигнала около 1 нс. Запись интерферограмм осуществлялась осциллографом Tektronics TDS 7104 DPO с полосой пропускания 1 ГГц.

Скорость звука в образцах за фронтом ударной волны определяли методом догоняющей разгрузки [8, 9] по значениям толщины образцов, на которых волна разрежения с тыльной стороны ударника догоняет ударный фронт в образце.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные для образцов из нанодисперсной смеси, приведены на рис. 2, *a*, для образцов из микродисперсной смеси — на рис. 2, *б*. На каждом рисунке представлено по три пары профилей скорости границы образец — вода, соответствующих трем различным давлениям нагружения. Профили в каждой паре получены для образцов с двумя различными толщинами. На каждом профиле видны удар-

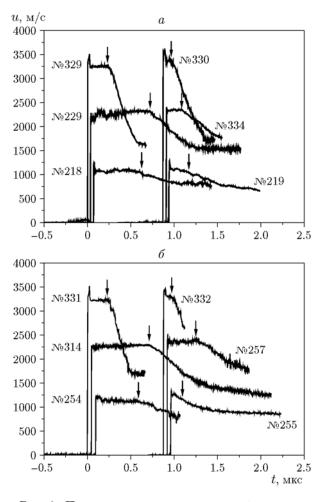


Рис. 2. Профили скорости границы образец — вода для образцов из нанодисперсной (a) и микродисперсной (b) смесей

ный скачок, область постоянного давления, искаженная осцилляциями, и разгрузка. Осцилляции за фронтом связаны с пористостью образцов, которая составляла $\varepsilon \approx 25 \%$. Пик скорости на некоторых профилях, наблюдающийся сразу после ударного скачка, не связан с реакцией и типичен для инертных пористых сред [13]. В экспериментах при максимальном давлении (60 ГПа) пик скорости обусловлен переотражением ударной волны в более толстой алюминиевой фольге (100 мкм), наклеенной на образец, вместо фольги толщиной 7 мкм, использованной в экспериментах при меньшем давлении. В экспериментах при низком давлении (см. рис. 2, нижние профили) возникает неоднозначность в определении точек начала разгрузки. Их положение уточнялось путем построения *x*-*t*-диаграмм, корректность которых определялась по согласованию с экспериментальными данными, полученными при более высоком давлении. На всех приведенных профилях на рис. 2 начало разгрузки отмечено вертикальными стрелками.

Построение зависимости длительности области постоянного давления (τ) на профилях (см. рис. 2) от толщины образца (h) при данном конкретном давлении позволяет определить толщину образца (H), на которой волна разгрузки догоняет ударную волну. Это проводится путем экстраполяции зависимости $\tau(h)$ к нулевому значению au. Как показано в работе [8], эта зависимость для химически инертных сред имеет линейный характер и может быть экстраполирована прямой линией. Она также будет иметь линейный характер в случае очень медленной или очень быстрой реакции [14]. В настоящей работе зависимость считалась линейной, поскольку на основании нашего предыдущего исследования [4] мы предполагаем, что если реакция и успевает начаться, то ее скорость весьма мала. Было установлено, что для образцов из нанодисперсной смеси толщина H составляет 5.4 ± 0.1 мм при $9.6 \Gamma\Pi a$, 9.6 ± 0.1 мм при $32.1~ \Gamma \Pi a$ и 4.9 ± 0.2 мм при 62.6 ГПа, а для образцов из микродисперсной смеси — 7.2 ± 0.1 мм при $9.4 \Gamma \Pi a$, 12.5 ± 0.4 мм при $31.7~\Gamma\Pi a$ и 5.1 ± 0.3 мм при $61.4~\Gamma\Pi a$. С использованием этих данных, а также зная ударные адиабаты ударника, образца и водяного окна, можно определить эйлерову скорость звука c в самом образце по следующей формуле [15]:

$$c = \frac{Hc_f D_f (D - u)}{Hc_f D_f - h_f D(c_f + u + D_f - v_f)},$$

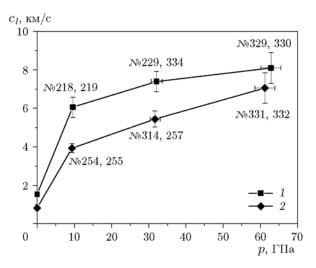


Рис. 3. Продольная скорость звука в образцах из смеси алюминия с никелем:

1 — нанодисперсная смесь, 2 — микродисперсная смесь

где D_f — скорость ударной волны в ударнике, c_f — скорость звука за фронтом ударной волны в ударнике при данном давлении (определялась в квазиакустическом приближении), D — скорость ударной волны в образце (определялась в экспериментах по определению ударной адиабаты [4]), u — скорость границы ударник — образец, h_f — толщина ударника, v_f — скорость ударника. Значения скорости звука для микрои нанодисперсной смеси приведены в табл. 1.

На рис. З представлены экспериментальные данные по зависимости скорости звука от давления в исследуемых образцах из нанои микродисперсной смесей. Значения скорости звука при нулевом (атмосферном) давлении получены на установке ультразвуковых измерений при сквозном прохождении ультразвука через образец на частоте 2.5 МГц. Для микродисперсной смеси скорость звука составила 0.82 ± 0.05 км/с, а для нанодисперсной — 1.53 ± 0.06 км/с.

На рис. З видно, что зависимость c(p) для пористых образцов из нанодисперсной смеси располагается выше, чем для микродисперсной. Данный эффект может быть обусловлен структурными характеристиками образцов, связанными с дисперсностью смесей, из которых они изготовлены, различным содержанием оксидов алюминия и никеля на поверхности частиц в микро- и нанодисперсных смесях [1] и, возможно, образованием NiAl. С ростом давления наблюдается тенденция к сбли-

Таблица 2

р, ГПа	ΔE , МДж		Агрегатные состояния	$C_{\text{Ni + Al}}$,	ΔT , K		T, K	
	микро	нано	компонентов в смеси	Дж/(кг · К)	микро	нано	микро	нано
9.5	0.340	0.340	Ni (тв), Al (тв)	588.6	577	578	850	851
			Ni (ж), Al (тв)	733.7	463	463	736	736
			Ni (ж), Al (ж)	820.8	414	414	687	687
32.0	1.245	1.288	Ni (тв), Al (тв)	588.6	2 115	2 187	2 388	2 460
			Ni (ж), Al (тв)	733.7	1 697	1 755	1 970	2 028
			Ni (ж), Al (ж)	820.8	1 517	1 568	1 790	1 841
62.0	2.553	2.623	Ni (тв), Al (тв)	588.6	4 336	4456	4 609	4729
			Ni (ж), Al (тв)	733.7	3479	3575	3 752	3 848
			Ni (ж), Al (ж)	820.8	3 109	3 196	3 382	3 469

Температура ударного сжатия в зависимости от предполагаемого агрегатного состояния компонентов в смеси

жению указанных зависимостей (см. рис. 3). При p = 60 ГПа скорости звука в микро- и нанодисперсных образцах за фронтом ударной волны становятся близкими и лишь немного выходят за пределы погрешности. Выравнивание скоростей звука в образцах обоих типов с ростом давления указывает на то, что, несмотря на существенное различие в дисперсности смесей, образцы при высоком давлении начинают проявлять одинаковые свойства. Исчезновение влияния дисперсности на скорость звука может быть обусловлено плавлением исходных компонентов. Образование NiAl также может сближать зависимости c(p). Однако это предполагает полное реагирование в смеси, что из-за значительного теплового эффекта реакции непременно должно приводить к появлению особенностей на зависимостях c(p), однако этого не наблюдается. Более естественным объяснением схождения зависимостей c(p) с ростом давления для микро- и нанодисперсных смесей представляется плавление компонентов в ударной волне. Для обоснования факта плавления при $p = 60 \ \Gamma \Pi a$ были проведены оценки положения ударных адиабат пористых микрои нанодисперсных образцов из смесей Ni + Al относительно линий плавления никеля и алюминия на основании данных из работы [4]. На рис. 4 в координатах Т-р приведены ударные адиабаты для микро- (1) и нанодисперсной (2) смесей [4], расчетная ударная адиабата для нереагирующей смеси (3), а также кривые плавления никеля (5) [16] и алюминия (6) [17].

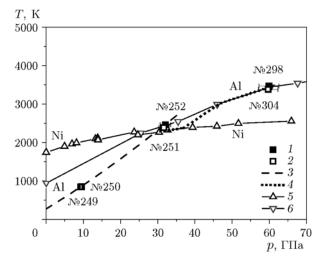


Рис. 4. Ударные адиабаты в координатах T-p:

1 — нанодисперсная смесь, 2 — микродисперсная смесь, 3 — расчетная ударная адиабата (до начала плавления), 4 — оценка хода ударной адиабаты после начала плавления; линии плавления никеля и алюминия: 5 — Ni [16], 6 — Al [17]

Температуры ударного сжатия в эксперименте определялись делением тепловой составляющей энергии сжатия на теплоемкость смеси, которая считалась постоянной, равной теплоемкости при атмосферном давлении. Поскольку агрегатные состояния компонентов смеси в экспериментальных точках ударных адиабат были неизвестны, то при расчете теплоемкости смеси рассматривались все возможные ва-

рианты: 1) ни один из компонентов не плавится; 2) никель плавится, алюминий не плавится; 3) плавятся оба компонента. Значения теплоемкостей твердых (Ni — 444.2 Дж/(кг · K), Al — 902.5 Дж/(кг·К)) [18] и расплавленных (Ni — $655.8 \, \text{Дж/(кг · K)}, \, \text{Al} = 1178.7 \, \text{Дж/(кг · K)}) \, [19]$ компонентов брали при атмосферном давлении. В табл. 2 представлены результаты расчетов температуры T для всех рассмотренных вариантов при трех значениях давления в эксперименте. Приведены также значения тепловой составляющей энергии сжатия ΔE , теплоемкости смеси $C_{\text{Ni} + \text{Al}}$ в зависимости от предполагаемого агрегатного состояния компонентов и разогрева вещества в ударной волне ΔT . Выбор из трех возможных значений теплоемкости смеси осуществлялся методом исключения при нанесении точек ударных адиабат на плоскость T-p вместе с линиями плавления никеля и алюминия. В результате было установлено, что при p = 10 и 30 ГПа плавление компонентов не происходит, а при $p = 60 \ \Gamma \Pi a$ плавятся оба компонента. На рис. 4 экспериментальные точки ударных адиабат как микро-, так и нанодисперсной смеси при $p \leqslant 30$ ГПа хорошо описываются расчетной ударной адиабатой, не учитывающей плавления [4]. Построить ход ударной адиабаты при $p > 30 \ \Gamma \Pi a$, где уже начинается плавление, можно, используя указанный выше подход к отбору теплоемкостей и интерполяцию экспериментальных точек ударной адиабаты прямой линией в области p = $30 \div 60$ ГПа. Получен следующий результат. Ударная адиабата после пересечения ею кривых плавления при $p = 30 \ \Gamma \Pi a$ (см. рис. 4) продолжает свой ход вблизи линии плавления никеля до $p = 37 \ \Gamma \Pi a$ (в образцах из чистого никеля ударная адиабата проходила бы вдоль линии плавления никеля), затем поднимается к линии плавления алюминия в точку, соответствующую $p = 47 \ \Gamma \Pi a$, далее идет вблизи линии плавления алюминия до максимального давления 60 ГПа и, наконец, ответвляется от нее вверх. Согласно проведенной оценке плавление никеля начинается при $p = 30 \ \Gamma \Pi a$ и уже при $p = 37 \ \Gamma \Pi a$ он оказывается полностью расплавленным. Плавление алюминия начинается при $p = 47 \ \Gamma \Pi a$ и заканчивается при $p = 60 \ \Gamma \Pi a$. Таким образом, сближение значений скорости звука в микро- и нанодисперсных образцах с ростом давления наиболее вероятно обусловлено не протеканием быстрой реакции за фронтом ударной волны, а плавлением.

Расхождение значений скорости звука при p=60 ГПа для обоих типов смесей, несколько превышающее погрешность, может быть объяснено более высоким содержанием оксидов в нанодисперсной смеси [1].

Итак, можно заключить, что, хотя ударноволновое воздействие на микро- и нанодисперсные смеси состава Al+Ni в ампулах сохранения приводит к инициированию реакции и полному реагированию, данная реакция не успевает развиться за время менее 1 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом догоняющей разгрузки определены скорости звука в ударно-сжатых реакционноспособных смесях микронных и наноразмерных порошков никеля и алюминия в диапазоне давления до 60 ГПа. Установлено, что в области давления до 60 ГПа скорость звука в нанодисперсных смесях выше, чем в микродисперсных. При приближении к 60 ГПа значения скорости звука в обоих составах выравниваются, что связано с полным плавлением компонентов. Таким образом, применение более чувствительной методики, основанной на измерении скорости звука в ударно-сжатом веществе, показало, что за время менее 1 мкс реакция Al + Ni если и начинается, то не успевает пройти на заметную глубину.

Авторы выражают благодарность М. Л. Кускову и А. Н. Жигачу (ИНЭПХФ РАН) за предоставленные нанопорошки, И. В. Колбаневу и А. А. Шевченко (ИХФ РАН) за подготовку механоактивированных смесей.

Работа выполнена на оборудовании Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН (ЦКПВ).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Жуков А. Н., Якушев В. В., Ананьев С. Ю., Добрыгин В. В., Долгобородов А. Ю. Исследование алюминида никеля, образовавшегося при ударно-волновом нагружении смесей алюминия с никелем в плоских ампулах сохранения // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 1. С. 72–80.
- Ananev S. Yu., Deribas A. A., Drozdov A. A., Dolgoborodov A. Yu., Morozov A. E., Povarova K. B., Yankovsky B. D. Dynamic compaction of Ni and Al micron powder blends in cylindrical recovery scheme // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653, N 1. P. 12037–12040.

- 3. Jetté F. X., Higgins A. J., Goroshin S., et al. In-situ measurements of the onset of bulk exothermicity in shock initiation of reactive powder mixtures // J. Appl. Phys. 2011. V. 109, N 8. 084905.
- 4. Якушев В. В., Ананьев С. Ю., Уткин А. В., Жуков А. Н., Долгобородов А. Ю. Ударная сжимаемость смесей никеля и алюминия из микро- и наноразмерных порошков // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 5. С. 45–50.
- 5. Eakins D., Thadhani N. N. Shock-induced reaction in a flake nickel + spherical aluminum powder mixture // J. Appl. Phys. 2006. V. 100, N 11. 113521.
- Song I., Thadhani N. N. Shock-induced chemical reactions and synthesis of nickel aluminides // Metallurg. Trans. A. — 1992. — V. 23, N 1. — P. 41–48.
- 7. Уткин А. В., Торунов С. И., Ефремов В. П., Фортов В. Е. Ударная сжимаемость смеси Zn + S при различной дисперсности цинка // XXI Междунар. конф. «Физика экстремальных состояний вещества 2006». Черноголовка: ИПХФ РАН, 2006. С. 68–69.
- McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures // Rev. Sci. Instr. 1982. V. 53, N 2. P. 245–250.
- 9. **Методы** исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М. В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
- 10. Якушев В. В., Уткин А. В., Милявский В. В., Жук А. З., Фортов В. Е. Ударная сжимаемость фуллерита C60 // VII Харитоновские научные чтения: тр. междунар. конф. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 269–274.
- 11. Yakushev V., Utkin A., Zhukov A. Porous silicon nitride under shock compression // Shock Compression of Condensed Matter 2011. P. 1529–1532. (AIP Conf. Proc.; V. 1426. 2012).

- 12. Жигач А. Н., Кусков М. Л., Лейпунский И. О., Стоенко Н. И., Сторожев В. Б. Получение ультрадисперсных порошков металлов, сплавов, соединений металлов методом Гена Миллера: история, современное состояние, перспективы // Рос. нанотехнологии. 2012. Т. 7. № 3-4. С. 28–37.
- 13. Гафаров Б. Р., Уткин А. В., Разоренов С. В. Структура фронта слабой ударной волны в высоконалолненных композитах // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 3. С. 161.
- 14. **Fritz J. N. et al.** Overdriven-detonation and sound-speed measurements in PBX-9501 and the «thermodynamic» Chapman Jouguet pressure // J. Appl. Phys. 1996. V. 80, N 11. P. 6129–6141.
- 15. Долгобородов А. Ю., Воскобойников И. М. Скорости звука в ударно-сжатых корунде, карбиде бора и карбиде кремния // Журн. техн. физики. 1993. Т. 63, вып. 2. С. 203–208.
- Lazor P., Shen G., Saxena S. K. Laser-heated diamond anvil cell experiments at high pressure: Melting curve of nickel up to 700 kbar // Phys. Chem. Minerals. 1993. V. 20, N 2. P. 86–90.
- 17. **Boehler R., Ross M.** Melting curve of aluminum in a diamond cell to 0.8 Mbar: implications for iron // Earth and Planetary Sci. Lett. 1997. V. 153, N 3. P. 223–227.
- Физические величины / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- Guthrie R. I. L., Iida T. Thermodynamic properties of liquid metals // Mater. Sci. Eng.: A. 1994. V. 178, N 1-2. P. 35–41.

Поступила в редакцию 10.07.2018. После доработки 11.10.2018. Принята к публикации 24.10.2018.