

МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ НАМАГНИЧЕННЫХ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНЕТИКОВ

В. В. Новиков, В. Н. Минеев

(Москва)

В послевоенные годы в связи с развитием техники получения больших электрических мощностей повысился интерес к преобразованию энергии удара в электромагнитную энергию. Энергия удара используется для освобождения запасенной в веществе электрической (эффект ударной деполяризации [1, 2]) или магнитной энергии (эффект ударного размагничивания [3]) либо преобразовывается в электромагнитную энергию (например, эффект ударной поляризации [2, 4]). Источником энергии удара часто является энергия взрывчатого вещества (ВВ), детонация которого генерирует в веществе ударную волну (УВ). Фронт УВ распространяется со звуковой или сверхзвуковой скоростью, плотность и температура вещества на фронте УВ увеличиваются скачком за время $\sim 0,001$ мкс [5].

Изменение плотности и температуры намагниченного вещества за фронтом УВ, как и при их статическом сжатии, приводит к изменению намагниченности вещества и, следовательно, к изменению магнитного потока в образце. Временное разрешение экспериментов по ударному размагничиванию меньше 10^{-7} с, поэтому, регистрируя в экспериментах с УВ изменение намагниченности вещества, можно получить информацию не только о кинетике фазовых превращений первого и второго рода, но и кинетике магнитоупругих эффектов за фронтом УВ. Магнитоупругие эффекты следует ожидать за счет негидростатического сжатия вещества на фронте УВ. Последнее является следствием конечной прочности вещества, которая достигает за фронтом величины 1—10 ГПа.

Проанализируем известные литературные данные об особенностях фазовых переходов, а также магнитоупругих эффектов, сопровождающих ударное сжатие намагниченного вещества. Весьма любопытным фактом, обнаруженным авторами экспериментально, является то, что в не полностью магнитно-упорядоченном ферромагнетике ударное сжатие сопровождается процессом дополнительного намагничивания [6].

Отметим, что вопрос о магнитных эффектах, сопровождающих ударное сжатие имеет не только научное, но и практическое значение, так как в настоящее время известны импульсные генераторы напряжения и тока, в основу работы которых положен эффект ударного размагничивания [7, 8].

Магнитные эффекты при фазовом переходе первого рода

Типичным и хорошо изученным фазовым переходом первого рода является переход в железе при его сжатии. Результаты экспериментов [9—12] показали, что в условиях статического и ударного сжатия железо из α -фазы (объемно-центрированный куб) переходит при определенных давлениях и температурах в γ - (гранецентрированный куб) или в ϵ - (плотно упакованная гексагональная структура) фазы. Кривые фазового равновесия железа и зависимость температуры за фронтом УВ в железе от давления на фронте (ударная адиабата) приведены на рис. 1.

Положение тройной точки T_p сосуществования α -, γ - и ϵ -фаз железа в плоскости $T-p$ характеризуется координатами $T = 775$ К и $p = 11,5$ ГПа. Зависимость начала фазового перехода на фронте УВ от концентрации (m) и типа примесей в железе приведена на рис. 2. Из рис. 1 видно, что α -железо, имеющее первоначально комнатную температуру, при давлении на фронте УВ ~ 13 ГПа переходит в ϵ -фазу. Результаты исследований [15—17] показали, что ϵ -фаза железа не ферромаг-

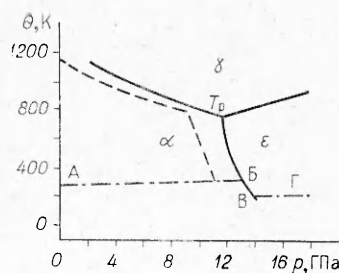


Рис. 1. Кривые фазового равновесия железа при статическом (штриховая линия) и ударном (сплошная линия) сжатиях [13]. Кривая АБВГ — ударная адиабата железа [14].

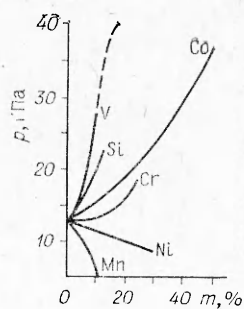


Рис. 2. Зависимость давления начала фазового превращения на фронте УВ от концентрации примесей в железе [13].

нитна. Считается доказанным, что ϵ -фаза при $p < 13$ ГПа не образуется [18].

Исходным экспериментальным материалом для построения динамической адиабаты железа, приведенной на рис. 1, является связь волновой и массовой скоростей УВ, измеренных за характерное время 1 мкс. Образование, в частности, в железе двухволновой конфигурации в области $p > 13$ ГПа и анализ возможных причин этого показывают, что эффект обусловлен фазовым $\alpha \rightarrow \epsilon$ -превращением в железе. Установлено, что за фронтом первой УВ железо находится в α -фазе, а вторая УВ, распространяющаяся за первой, переводит железо из α - в ϵ -фазу. Время фазового превращения $\sim 0,2$ мкс [19, 20]. $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ -переход является быстрореверсивным. В пользу этого свидетельствует тот факт, что в образцах железа, сохраненных после ударного нагружения, ϵ -фаза не обнаружена [21].

Обратимся к результатам экспериментов по размагничиванию железа в ударных волнах. Типичная схема эксперимента по изучению магнитных эффектов при ударном сжатии вещества приведена на рис. 3. УВ воздействует на образец, который включен в магнитную цепь. Магнитный поток в магнитопроводе и, следовательно, в образце создается с помощью пропускания электрического тока по намагничивающей обмотке. Условия эксперимента обеспечивают одномерное и однократное сжатие образца. Уравнения состояния материала образцов находились из независимых экспериментов [14].

В опытах по схеме рис. 3 регистрируется изменение магнитного потока в образце с помощью измерительной обмотки, расположенной вблизи образца. Намагниченность вещества влияет на магнитный поток в измерительной обмотке и индуцирует в ней ЭДС. Магнитная цепь выполняется из материала, обладающего малым временем диффузии магнитного потока. Это делается для того, чтобы избежать временных искажений в процессе регистрации потока. Сигнал с измерительной обмотки с помощью радиотехнического кабеля подается на вход осциллографа. Если индуктивное сопротивление измерительной обмотки много меньше активного сопротивления измерительной цепи (дифференцирующая измерительная цепь), то регистрируемый сигнал равен индуцированной в обмотке ЭДС (E). В этом случае изменение магнитного потока

$$\Delta\Phi = \int_{t_1}^{t_2} E dt,$$

где t_1 и t_2 — моменты времени входа и выхода фронта УВ из образца.

Если индуктивное сопротивление обмотки много больше активного сопротивления измерительной цепи (интегрирующая цепь), то $E \sim \Delta\Phi$. Поскольку основной характеристикой ферромагнетика является намагни-

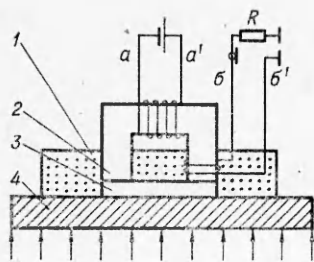


Рис. 3. Схема экспериментального устройства при исследованиях ударного размагничивания веществ.

1 — предохранитель от волн разрежения; 2 — магнитопровод; 3 — образец; 4 — экран взрывного устройства или мишень, по которому бьет ударник; $a-a'$ — намагничивающая обмотка; $б-б'$ — измерительная обмотка; R — входное сопротивление осциллографа. Стрелками показано направление движения фронта УВ.

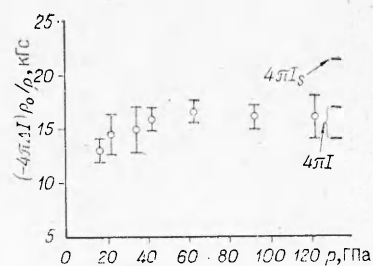


Рис. 4. Зависимость изменения намагниченности железа от давления на фронте УВ [17].

ченность (магнитный момент единицы объема вещества), то расчетным путем или с помощью калибровки от $\Delta\Phi$ можно перейти к величине

изменения намагниченности ΔI . Способы перехода от $\Delta\Phi$ к ΔI в экспериментах с ударным сжатием подробно описаны в [22, 23].

На рис. 4 приведены результаты экспериментов по изучению зависимости намагниченности железа от давления на фронте УВ [17]. Начальная величина намагниченности железа $I_0 = 0,72I_s$, где I_s — намагниченность насыщения железа при нормальных условиях. Поскольку за фронтом УВ вещество сжимается, на рис. 4 начальное значение магнитного момента единицы объема принимается равным σI_0 . Сравнение данных, приведенных на рис. 1 и 4 показывает, что размагничивание железа в УВ начинается при $p = p_b$, а завершается при $p > p_b$.

Вихревые токи могут маскировать действительное изменение магнитного потока в веществе. В работе [6] с целью исключения влияния вихревых токов изучение магнитных эффектов в железе проводилось на образцах из магнитодиэлектрика, состоящего из изолированных шариков железа (диаметр $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ мм), погруженных в связующую массу из бакелитовой смолы (4,2% массы) [24]. В экспериментах [23] толщина листов, из которых изготовлены образцы, равна $\sim 10^{-4}$ мм, т. е. в [6] время затухания вихревых токов уменьшено еще в 10^4 раз.

Результаты экспериментов по ударному сжатию образцов из магнитодиэлектрика приведены на рис. 5, 6, где показано, что УВ может не только приводить к размагничиванию железа, но при давлениях, меньших давления начала фазового перехода, оказывать ориентирующее действие на доменную структуру железа. Дополнительное намагничивание при $p = 9$ ГПа (см. рис. 6) зависит от степени упорядоченности исходной магнитной структуры железа: с ростом величины намагничивающего поля дополнительное намагничивание уменьшается. Увеличение намагниченности железа под действием УВ в условиях, когда железо не находится в состоянии магнитного насыщения, можно объяснить тем, что УВ вносит в образец энергию, способствующую перестройке доменов в направлении внешнего магнитного поля.

Интересно отметить, что если волна разгрузки в таком веществе не приведет к изменению намагниченности или время действия давления за фронтом УВ будет большим в сравнении с временем релаксации доменных процессов, то вещество в образце будет намагничено больше, чем это возможно в данной магнитной цепи в статических условиях. Этот избыток магнитной энергии относительно равновесной величины приве-

¹ В экспериментах, где вещество подвергается сжатию, более удобно пользоваться другой единицей — намагниченностью единицы массы J . Связь между ними следующая: $\Delta I/\sigma I_0 = \Delta J/J_0 + (1 - 1/\sigma)$, где $\Delta I = I - I_0$; $\Delta J = J - J_0$; $\sigma = \rho/\rho_0$; I_0 , J_0 , ρ_0 — начальные намагниченности и плотность, а I , J и ρ — то же за фронтом УВ; σ — сжатие вещества.

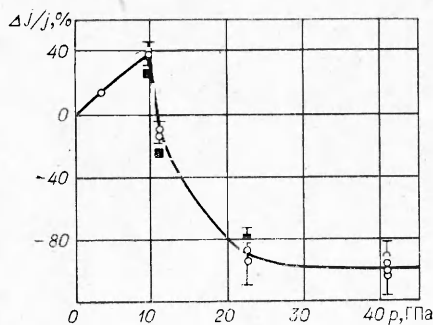


Рис. 5. Изменение намагниченности железа при ударном сжатии в слабых ($I \sim 4 \cdot 10^{-3} I_s$) намагничивающих полях [6].

дет к изменению магнитного потока в образце с характерным временем порядка времени релаксации доменных процессов.

Отметим, что в опытах [6], как и в измерениях [25], завершение фазового превращения $\alpha \rightarrow \epsilon$ происходит при давлениях, значительно превышающих 13 ГПа.

Увеличение намагниченности при $p < p_B$, обнаруженное при ударном сжатии карбонильного железа, не характерно для всех ферромагнетиков. Например, в случае сплава 3% Si + 97% Fe намагничивание начинается при $p < p_B = 14,5$ ГПа, интенсивно протекает до $p = 22$ ГПа и завершается при $p \geq 25$ ГПа [26] (рис. 7).

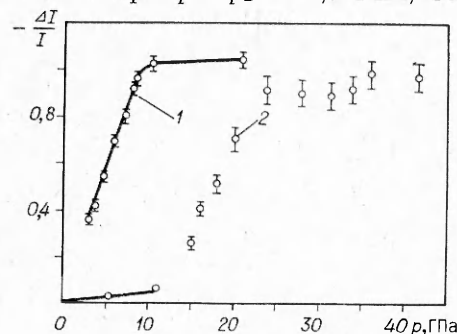


Рис. 7. Изменение намагниченности при ударном сжатии веществ, претерпевающих фазовые переходы первого (2) и второго (1) рода.

1 — инвар (36% Ni + 64% Fe); 2 — сплав «силектрон» (3% Si + 97% Fe) [26].

Процесс дополнительного намагничивания, обнаруженный при ударном сжатии карбонильного железа при $p < p_B$, по-видимому, связан с ориентацией доменов в магнитном поле за счет энергии УВ.

Магнитные эффекты при фазовом переходе второго рода

Ударное сжатие, как и гидростатическое, приводит к понижению точки Кюри большинства ферромагнетиков. Переход в парамагнитное состояние происходит без изменения плотности. Эксперименты по изучению ударной сжимаемости образцов из сплава 36% Ni + 64% Fe или 30% Ni + 70% Fe показали [27], что при $p = 2,5$ ГПа ($\sigma = 1,02$) наблюдается излом кривой сжимаемости. Оценки показывают, что температура ударно-сжатых образцов составляет $\Theta = 25^\circ\text{C}$. Если принять это значение за температуру Кюри при данном давлении (точка Кюри при $p = 0$ равна 153°C), то $d\Theta/dp = -51 \text{ K} \cdot \text{ГПа}^{-1}$. При статическом сжатии $d\Theta/$

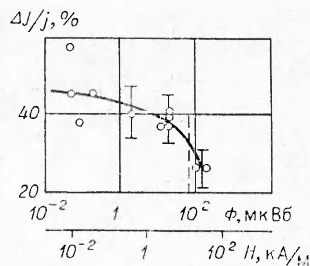


Рис. 6. Зависимость дополнительного намагничивания железа от величины внешней линии показана величина H , при него поля при давлении 9 ГПа [6]. Штриховкой должно начаться размагничивание, если бы дополнительное намагничивание было обусловлено магнитоупругим эффектом в железе. Экспериментальные данные показывают, что наблюдаемый эффект имеет другую природу.

Итак, ударно-волновое сжатие ферромагнетика может вызывать эффекты намагничивания и размагничивания вещества. Процесс ударного размагничивания начинается при давлении, соответствующем началу фазового превращения, определенному по результатам измерения кинематических параметров УВ, а завершается при значительно большем значении p . Таким образом, по крайней мере в случае ферромагнетиков существующая точность измерения кинематических параметров УВ ($\sim 1\%$) не позволяет судить о степени завершенности процессов фазовых превращений.

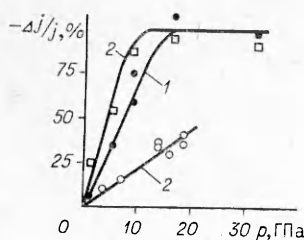


Рис. 8. Изменение намагниченности при ударном сжатии сплошного и пористого образца.

1 — «пористый» образец 50НХС; 2 — «пористый» образец 79НМ; 3 — сплошной образец 79НМ.

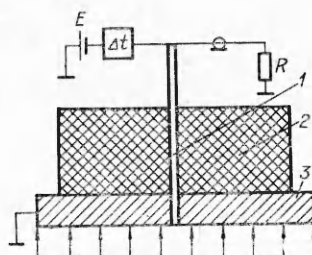


Рис. 9. Схема экспериментального устройства для ударного сжатия образцов в виде проволоочки, намагничиваемой протекающим по ней током от источника E [28].

1 — образец (проволочка); 2 — блок из фторопласта; 3 — экран взрывного устройства; R — входное сопротивление осциллографа; Δt — линия задержки для развязки измерительной и намагничивающей цепей. Стрелками показано направление движения фронта УВ.

$/dp = -(32 \div 59) \text{ К} \cdot \text{ГПа}^{-1}$ для $p \leq 0,5 \text{ ГПа}$ [27]. Совпадение сравнимых производных свидетельствует о возможности фазового перехода второго рода в исследуемом веществе. Непосредственное измерение намагниченности при статическом и ударном нагружении образцов сплава 31,4% Ni + 68,6% Fe показало [23], что при ударном нагружении $I_s^{-1} (dI_s/dp) \approx -(28 \div 33) \text{ ГПа}^{-1}$, при статическом — $(35 \div 37) \text{ ГПа}^{-1}$. Зависимость намагниченности насыщения сплава 36% Ni + 64% Fe от давления на фронте УВ приведена на рис. 7.

Прямыми экспериментами, свидетельствующими о значительной роли температуры в процессе ударного размагничивания железоникелевых сплавов, являются эксперименты авторов со сплошными и «пористыми» образцами пермаллоя 79НМ (79% Ni + 17% Fe + 4% Mo, W, V). Известно, что при равных давлениях на фронте УВ в сплошном и пористом веществах последнее нагревается до более высокой температуры, чем сплошное [13]. В нашем случае пористые образцы выполнялись в виде стопки тонких (0,03 мм) изолированных фольг, причем в изоляции имелись воздушные включения.

Результаты этих экспериментов приведены на рис. 8. Оценки температуры по [13] показывают, что при $p = 20 \text{ ГПа}$ температура сплошного образца составляет $T \approx 600 \text{ К}$, а пористого — 800 К. Температура Кюри этого сплава при нормальном давлении равна 750 К. Именно поэтому при $p = 20 \text{ ГПа}$ пористые образцы размагничиваются почти полностью. В пользу определяющей роли температуры за фронтом УВ на ударное размагничивание железоникелевых сплавов свидетельствуют также результаты опытов авторов с образцами сплава 50НХС (50% Ni + 45% Fe + 4% Cr + 1% Si), приведенные на рис. 8. Результаты этих экспериментов находятся в плоскости $\Delta J/J - p$ левее результатов опытов с образцами из 79НМ, что согласуется с меньшей температурой Кюри ($\Theta = 650 \text{ К}$) этого сплава.

Проведенные эксперименты показывают, что размагничивание железоникелевых сплавов с гранецентрированной кубической решеткой обусловлено как понижением температуры Кюри, так и уменьшением намагниченности насыщения с ростом ударного давления. Особенность описанных выше экспериментов состоит в том, что повышение температуры и плотности (давления) происходит одновременно и при однозначном соотношении.

Изменение намагниченности вещества может маскироваться индуцированными в образце вихревыми токами, которые замедляют процесс диффузии магнитного потока из образца. Этот эффект может привести к ошибкам в определении намагниченности. Роль времени диффузии магнитного потока авторы определили на примере сплава 79НМ [28]. Время изменения магнитного потока определяется двумя факторами: инерцией в изменении величины спонтанной намагниченности по отноше-

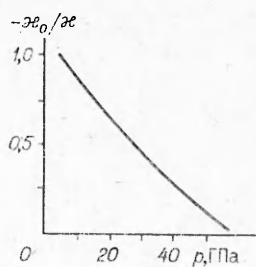


Рис. 10. Зависимость от давления коэффициента диффузии магнитного потока для сплава 79NM [28].

нию к воздействию УВ и временем диффузии магнитного потока. Экспериментальное определение времени изменения магнитного потока наталкивается на трудность, связанную с одновременным входом фронта УВ в магнитный образец. С целью уменьшения этой неодновременности образец изготовлялся в виде проволоки с диаметром 0,7 мм, ориентированной перпендикулярно фронту УВ (рис. 9). Проволока помещалась без зазора в блок из фторопласта. В исследованном диапазоне ударных давлений от 4 до 55 ГПа электрическое сопротивление фторопласта практически не изменяется [24] и не влияет на электромагнитные процессы в образце. Образец намагничивался до насыщения протекающим по нему током.

Осциллограмма ЭДС имеет вид ступеньки с экспоненциальным фронтом. По ней определялось время нарастания ЭДС до максимума (t_{\max}) и вычислялись постоянная времени нарастания и коэффициент диффузии κ : $\tau = 0,2 (1 - u/D)t_{\max}$ и $\kappa_0/\kappa = \tau/\tau_0$, где u и D — массовая и волновая скорости фронта УВ во фторопласте; κ_0 и τ_0 — коэффициент диффузии и постоянная времени нарастания при $p = 4$ ГПа — наименьшем давлении, при котором проводились эксперименты (рис. 10) [28]. Из этих измерений следует, что при изменении давления от 4 до 55 ГПа коэффициент диффузии магнитного потока увеличивается не менее чем на порядок. Это происходит вследствие изменения величины спонтанной намагниченности и проводимости за фронтом УВ. Известно также, что магнитная проницаемость сплава 79NM при сжатии уменьшается, но разделить влияние различных факторов на коэффициент диффузии не представляется возможным.

Ударное размагничивание ферритов

Первые эксперименты по ударному размагничиванию ферритов проведены с никелевым ферритом [22]. Обнаружен значительный эффект при относительно низких давлениях. Так, размагничивание на 90% происходит еще в упругой области сжатия (при 4 ГПа), но полное — не достигается и при 30 ГПа. Объяснение такому поведению феррита в УВ найдено в магнитоупругом эффекте [17]. При сжатии вещества УВ за ее фронтом помимо изотропных существуют также и неизотропные, перпендикулярные фронту напряжения. Магнитоупругий эффект проявляется в том, что неизотропные напряжения создают во всей доменной структуре феррита новое направление легкого намагничивания. В результате этого намагниченность в направлении внешнего поля уменьшается (если эти два направления не совпадают). Степень размагничивания при одном и том же давлении в этом случае зависит от величины внешнего поля, которое препятствует перестроению доменной структуры.

На рис. 11 приведены полученные авторами результаты опытов по ударному размагничиванию никель-цинкового феррита 600НН. Измерения производились при двух величинах намагничивающего поля $H = 2,5$ (1) и 103 кА/м (2). Там же приведен результат, полученный при $H = 8760$ кА/м (3) в импульсном режиме намагничивания для никелевого феррита [17]. Последний является пока единственным измерением, характеризующим истинное размагничивание феррита, поскольку величина H исключает проявление магнитоупругого эффекта (величина эквивалентного намагничивающего поля, соответствующего наведенной УВ магнитной анизотропии, равна ~ 800 кА/м [17]).

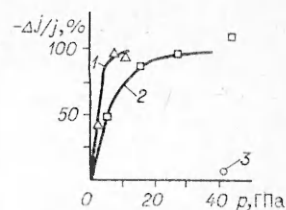


Рис. 11. Изменение намагниченности ударно-сжатого феррита 600НН при различных величинах намагничивающего поля.

Некоторые общие замечания о процессах освобождения запасенной энергии в ударно-сжатом веществе

Процессы ударного размагничивания магнитных материалов и ударной деполяризации нелинейных диэлектриков формально во многом сходны. Оба определяются как процессами уменьшения соответственно намагниченности и поляризации вещества, так и процессами ориентации носителей магнитного и электрического полей в поле механических сил за фронтом УВ. По-видимому, уменьшение намагниченности и поляризации вещества за фронтом УВ происходит за счет значительного увеличения плотности энергии вещества за фронтом, достигающей величины 10^{10} — 10^{11} эрг/см³. Этой энергии достаточно для разрушения дальнего порядка (например, для плавления) рассматриваемых структур. Процессы ориентации носителей магнитного и электрического полей определяются не всей энергией вещества за фронтом УВ, а только ее частью, обусловленной негидростатичностью сжатия вещества вследствие его конечной прочности. Эта часть плотности энергии определяется пределом текучести Гюгонио рассматриваемых веществ, который равен 10^9 — 10^{10} эрг/см³, что на несколько порядков превышает энергию анизотропии исходных решеток. Процессы ориентации характеризуются временами порядка 1—10 мкс, не сильно отличающимися от соответствующих значений при нормальных условиях.

Представляет практический интерес сравнить реализованную плотность электрической и магнитной энергии за фронтом УВ при процессах ударной поляризации, деполяризации и размагничивания. Эти величины приведены в таблице. Для сравнения укажем, что энергоемкость конденсаторов составляет 10^7 эрг/см³.

Результаты сравнения показывают, что плотности энергии в сравниваемых процессах отличаются на 9 порядков. В случае ударной деполяризации монокристаллов PbTiO_3 и LiNbO_3 плотность электрической энергии за фронтом УВ сравнима с изменением плотности энергии за счет их ударного сжатия.

Возникновение ударной поляризации и нестационарность процессов поляризации, деполяризации и размагничивания при ударе свидетельствуют об отсутствии строгого термодинамического равновесия за фронтом УВ. В связи с этим представляет интерес сравнение данных о фазовом состоянии магнитных материалов при гидростатическом и ударном сжатиях.

Процесс	Вещество	Плотность энергии, эрг/см ³
Ударная поляризация	Полярные диэлектрики, ионные кристаллы	10 — 10^5
Ударное размагничивание	Железо, сплавы железа с никелем	10^5
Ударная деполяризация	Монокристаллы:	
	PbTiO_3 LiNbO_3	10^9 10^{10}

Проведенные сравнения [17, 23, 25] показывают, что между ними существует небольшое расхождение, которое, по-видимому, может быть устранено увеличением точности измерений кинематических параметров УВ или непосредственными измерениями плотности и сжимаемости веществ за фронтом УВ в диапазоне давлений фазовых превращений первого и второго родов. Эти данные будут представлять интерес для разработки кинетики рассматриваемых фазовых превращений при ударном нагружении вещества.

Поступила в редакцию 4/X 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. F. W. Neilson. Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 1957, 2, 302.
2. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов. УФН, 1976, 119, 75.
3. G. W. Anderson, F. W. Neilson. Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 1957, 2, 302.
4. R. I. Eichelberger, G. E. Hauver.— In: Les ondes de detonation, 1961.
5. L. C. Chhabidas, J. R. Asay. J. Appl. Phys., 1979, 50, 4, 2749.
6. В. В. Новиков, В. Н. Минеев. ЖЭТФ, 1974, 67, 1441.
7. V. W. Kulterman, F. W. Neilson, W. B. Benedick. J. Appl. Phys., 1958, 29, 500.
8. J. H. Johnson. J. Appl. Phys., 1959, 30, 2415.
9. D. Bancroft, E. L. Peterson, F. S. Minshall. J. Appl. Phys., 1956, 27, 291.
10. A. A. Balchan, H. G. Drickamer. Rev. Sci. Instrum., 1961, 32, 308.
11. P. C. Johnson, B. A. Stein, R. S. Davis. J. Appl. Phys., 1962, 33, 557.
12. I. S. Rinehart, J. Pearson. Behaviour of Metals under Impulsiv Coods. Cleveland, ASM, 1954.
13. G. E. Duvall, R. A. Graham. Rev. Mod. Phys., 1977, 49, 523.
14. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
15. R. N. Keeler, A. C. Mitchell. Solid State Commun., 1969, 7, 271.
16. D. N. Pirkorn, C. K. Edge e. a. Phys. Rev., 1964, 135, 1604.
17. E. V. Royce.— In: Proc. Symp. High Dynamic Pressure. Paris, 1967.
18. L. M. Barker. J. Appl. Phys., 1975, 46, 2544.
19. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ЖЭТФ, 1964, 47, 814.
20. L. M. Barker, R. E. Hollenbach. J. Appl. Phys., 1974, 45, 4872.
21. В. Н. Герман, М. П. Сперанская, Л. В. Альтшулер и др. ФММ, 1970, 30, 1018.
22. E. V. Royce. J. Appl. Phys., 1966, 37, 4066.
23. R. C. Wayne. J. Appl. Phys., 1969, 40, 15.
24. В. А. Злобин, Т. С. Муромкина, П. В. Поселов. Изделия из ферритов и магнито-дieleктриков. Справочник. М.: Советское радио, 1972.
25. Р. Килер, Е. Ройс.— В кн.: Физика высоких плотностей энергии/Ред. П. Кальдиrola и Г. Кнопфель. М.: Мир, 1974.
26. R. A. Graham. J. Appl. Phys., 1968, 39, 437.
27. R. A. Graham, D. A. Anderson, J. R. Holland. J. Appl. Phys., 1967, 38, 223.
28. В. В. Новиков, В. Н. Минеев.— В кн.: Физика импульсных давлений. Вып. 44 (74). М., 1979.

О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ВЫБРОСА ГРУНТА ВЗРЫВОМ

*О. А. Арутюнов, С. С. Григорян, Р. З. Камалян
(Москва)*

Взрыв на выброс представляет собой сложное явление, определяемое рядом взаимодействующих факторов. С одной стороны, значительную роль в развитии процесса играют такие параметры, как интенсивность и длина волны сжатия, а также величина давления и состав газообразных продуктов в полости взрыва. Эти параметры определяют запас энергии, сообщаемой выбрасываемому грунту. С другой стороны, значительное влияние оказывают свойства среды, поскольку окончательный запас кинетической энергии грунта, который и является определяющим выброс, зависит еще от того, сколько переданной грунту энергии израсходуется необратимо на разрушение и преодоление сил связи и трения в самом грунте [1]. Несмотря на то, что указанные факторы неразрывно связаны между собой, в настоящее время еще не представляется возможным отобразить эту связь простыми количественными соотношениями, необходимыми для прогноза показателей выброса. Результаты современных исследований прояснили отдельные стороны этого сложного явления; благодаря им стала возможной схематизация процесса выброса грунта, уточнение влияния и вклада отдельных стадий на результат выброса в целом и т. д. [2—4].

Основным аспектом использования энергии взрыва в практических целях является ее механическое действие. Вместе с тем, как отмечается многими исследователями [4, 5], коэффициент полезного использования энергии взрыва для совершения механической работы довольно низок и составляет величину порядка 10—15%. Причина столь низкого КПД обу-