

05.07.11

Ориентационный магнитный фазовый переход, индуцированный при ударном нагружении сплава Fe–Cr–Co

© Ю.В. Судьенков, В.М. Сарнацкий, И.В. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: y.sudenkov@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 29 марта 2016 г.
В окончательной редакции 13 июля 2016 г.)

В процессе исследований прочностных характеристик при высокоскоростном деформировании сплавов Fe–Cr–Co обнаружено, что в результате ударного нагружения в образцах и их фрагментах возникает значительная остаточная намагниченность, обусловленная ориентационным магнитным фазовым переходом. В работе определены пороговые давления магнитного фазового перехода и исследовано распределение остаточной намагниченности в образцах.

Работа осуществлена в рамках проекта РНФ № 15-19-00182.

DOI: 10.21883/FTT.2017.02.44048.113

1. Введение

Магнитотвердые материалы на основе сплавов системы Fe–Cr–Co [1] обладают удачным сочетанием высоких магнитных свойств с коррозионной стойкостью, достаточной прочностью и пластичностью. Прочность и пластичность таких сплавов широко исследовались в квазистатических испытаниях, например в работах [1–4], однако информация о прочности и пластичности при ударных нагрузках весьма ограничена. Влияние перестройки структуры материала на процессы динамической деформации и разрушения недостаточно изучено, поэтому поведение сплавов Fe–Cr–Co при ударных нагрузках плохо прогнозируемо.

В работах [5,6] представлены результаты исследования динамических свойств ферромагнитного сплава с различной термомагнитной обработкой, а также изменения микроструктуры материала после ударной нагрузки микро- и субмикросекундной длительности. В результате исследований была обнаружена намагниченность образцов после ударной нагрузки, при этом до динамического воздействия образцы не проявляли магнитных свойств. В продолжение исследований [5,6] в настоящей работе представлены результаты исследований остаточной намагниченности образцов после ударного воздействия и параметров фазового перехода.

2. Материал и методика исследований

Исследования проводились для сплава Fe–25%Cr–12%Co (0.9%Si, 0.09%Mn, 0.025%C). Образцы сплава представляли собой диски $\varnothing 40 \times (4–9)$ mm, предварительно подвергнутые различной термообработке [5,6]: № 1 — закалка, затем старение в магнитном поле, № 2 — закалка, затем старение без магнитного поля и № 3 — закалка.

Для генерации хорошо контролируемых ударных нагрузок в твердых телах была разработана методика, использующая симметрию электрического взрыва тонких фольг и лазерную интерферометрическую диагностику скорости движения свободной поверхности нагружаемых объектов [7]. Разработанный метод позволяет проводить лабораторные исследования процессов деформации и разрушения при высокоскоростном нагружении материалов в диапазоне длительностей $\sim 0.1–1 \mu\text{s}$ и давлений до 20 GPa, существенно повысив информативность ударно-волновых экспериментов.

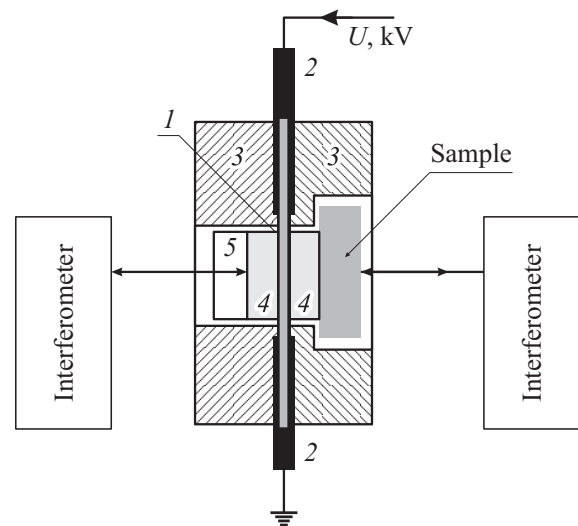


Рис. 1. Схема методики исследования ударно-волновых процессов в твердых телах при использовании симметрии электрического взрыва фольг, где 1 — Al фольга $0.03 \times 20 \times 35$ mm, 2 — электроды, 3 — корпус из диэлектрика, 4 — волноводы $\varnothing 20$ mm, 5 — оптическое зеркало (ПММА, кварцевое стекло, сапфир).

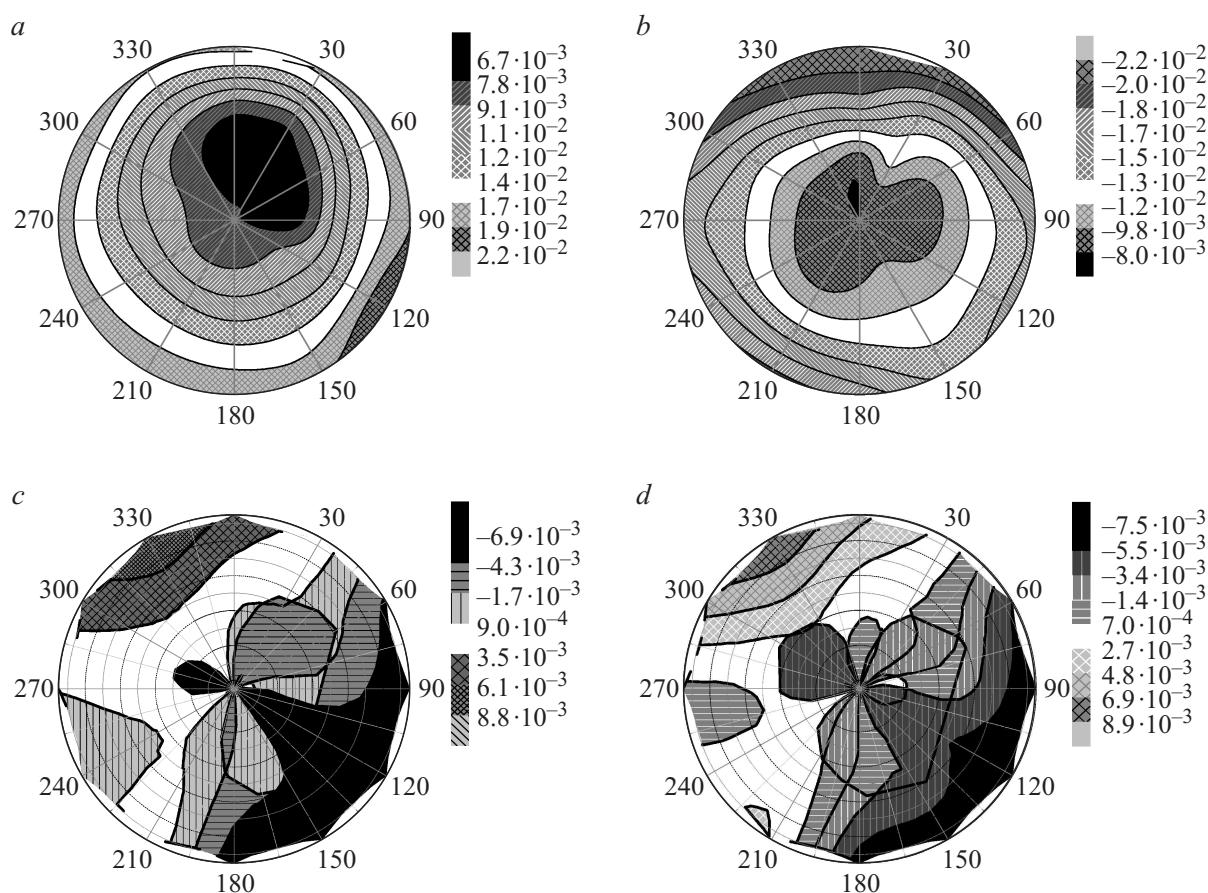


Рис. 2. Распределение остаточной намагниченности (в полярных координатах) в образцах с обработкой № 1 и № 2. Цифры в верхнем правом углу соответствуют величине магнитной индукции.

Симметричность электрического взрыва тонких фольг дает возможность контроля как параметров импульса нагружения, так и параметров ударного импульса, прошедшего через образец. На рис. 1 представлена схема метода. Взрывающаяся фольга (1) зажимается между двумя одинаковыми волноводами (4), к одному из которых прижат исследуемый образец.

В качестве волноводов использовались цилиндры из высокопрочной стали $\varnothing 20 \times 18$ mm. Поверхности волноводов и образцов тщательно шлифовались и полировались. Качество граничных условий на контактных поверхностях волноводов и образцов и определяет в основном точность измерений.

Таблица 1. Параметры материала образцов. ρ — плотность материала, C — скорость звука, E — модуль упругости, HV — микротвердость

Fe—Cr—Co	ρ , g/cm ³	C , m/s	E , GPa	HV, MPa
Обработка № 1	7.685 ± 0.005	6185 ± 5	294 ± 2.5	4225 ± 5
Обработка № 2	7.695 ± 0.005	6055 ± 5	282 ± 2.5	2565 ± 5
Обработка № 3	7.665 ± 0.005	6215 ± 5	296 ± 2.5	4255 ± 5

Измерения скоростей свободной поверхности образца и волновода осуществлялись лазерными дифференциальными интерферометрами либо непосредственно со свободных поверхностей, либо с применением „оконной“ методики [8,9]. Анализ профилей скорости свободной поверхности образцов дает возможность получить данные о динамическом пределе упругости, значениях откольной прочности и возможных фазовых переходах.

Перед проведением ударных испытаний проводилось измерение микротвердости, плотности материала и скорости упругих волн в образцах, после чего были рассчитаны упругие модули. Результаты измерений представлены в табл. 1.

3. Результаты и обсуждение

После проведения ударного нагружения образцов было обнаружено наличие остаточной намагниченности образцов № 1 и № 2, а также их фрагментов. Возникновение остаточной намагниченности указывает на реализацию магнитного фазового перехода, индуцированного в результате ударного нагружения.

Распределение остаточной намагниченности на поверхностях образцов измерялось датчиком Холла с

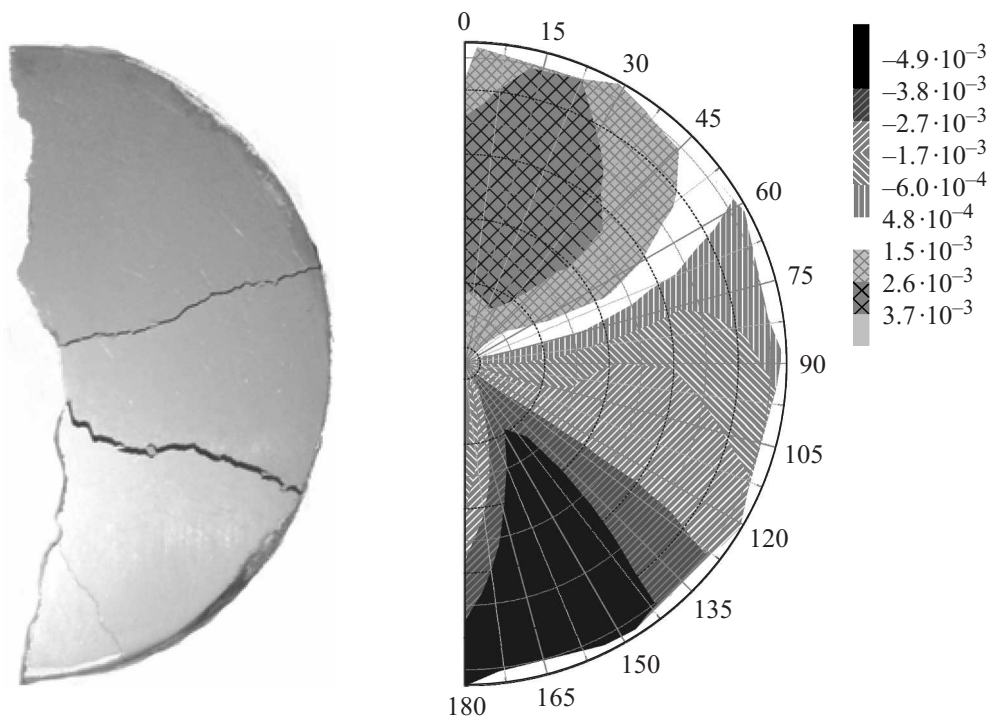


Рис. 3. Сопоставление трещин и распределения намагниченности в образце после ударного воздействия.

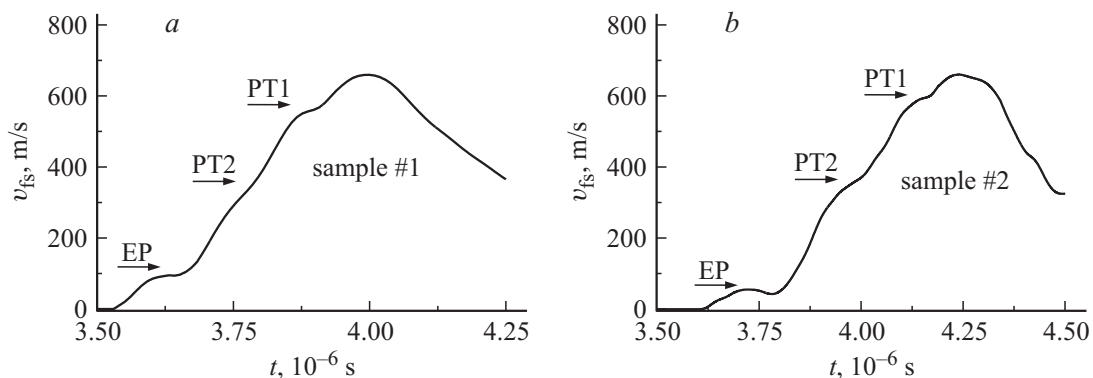


Рис. 4. Скорость свободной поверхности образца при выходе импульса напряжений.

диаметром рабочей поверхности 5 mm. Поверхности образца были поделены на сектора с углом 30° и окружностями с радиусами 5, 10, 15 и 20 mm.

На рис. 2 представлены примеры распределения остаточной намагниченности (в полярных координатах) в образцах с режимами обработки № 1 и № 2: на рис. 2, *a, b* для лицевой и обратной стороны образца с обработкой № 1, а на рис. 2, *c, d* для образца с обработкой № 2.

Результаты измерений демонстрируют существенную неоднородность распределения остаточной намагниченности по поверхности образцов. В некоторых образцах различалась только величина магнитной индукции (рис. 2, *a, b*), а в некоторых и ее знак (рис. 2, *c, d*).

Существенную роль в наличие такой неоднородности внес процесс и характер разрушения образцов

в результате ударной нагрузки. Разрушение образцов протекало по нескольким механизмам: откольного механизма в центральной области образца, выбивания пробки (область ударного нагружения $\sim \varnothing 20$ mm), а также радиального разрушения в результате действия растягивающих напряжений. Отметим, что величина остаточной намагниченности в центральной области действия плоской волны напряжений во всех образцах была минимальна.

Корреляция распределения намагниченности с характером разрушения образца представлена на рис. 3.

Наличие индуцированного магнитного фазового перехода подтверждается также характерным видом зависимости скорости свободной поверхности этих образцов. На рис. 4 приведены типичные временные профили скорости свободной поверхности образцов.

Таблица 2. Результаты измерений. σ_{ep} — напряжение упругого предвестника, σ_{sp} — откольная прочность, σ_{PT1} — напряжение первого фазового перехода, σ_{PT2} — напряжение второго фазового перехода

Обработка	σ_{ep} , GPa	σ_{sp} , GPa	σ_{PT1} , GPa	σ_{PT2} , GPa
№ 1	2.2	8.0	7.15	13.1
№ 2	1.3	11.0	7.9	13.5
№ 3	6.2	12.4	нет	нет

Временные профили импульсов, прошедших через образцы, с одной стороны, имели вид, характерный для упругопластических материалов [10–12], а с другой, в образцах № 1 и № 2 наблюдались и существенные отличия (рис. 4, *a, b*). Помимо упругого предвестника (EP), на фронте видны два перегиба, отмеченные на рис. 4 как PT1 и PT2. Такие характерные изменения фронта ударной нагрузки обычно наблюдается при полиморфных фазовых переходах в материалах, например при фазовом переходе $\alpha-\epsilon$ в железе и его сплавах [10–12]. В области фазового перехода ударная адиабата претерпевает изломы, что и проявляется на фронте импульса скорости свободной поверхности.

Значения скорости свободной поверхности V_{sf} связаны с напряжениями в образце простым соотношением [10,11]

$$\sigma = 0.5\rho c_L V_{sf},$$

где ρ — плотность материала; c_L — продольная скорость звука.

Наблюдаемый в образцах с обработкой № 1 и № 2 фазовой переход PT1 с величинами напряжений — $\sigma_{PT1}^{№1} \cong 1.31$ GPa и $\sigma_{PT1}^{№2} \cong 1.35$ GPa как раз и соответствует этому хорошо известному для железа и его сплавов фазовому переходу $\alpha-\epsilon$ [10,12], с пороговым значением которого согласуются результаты измерений.

Помимо этого фазового перехода наблюдается еще один фазовый переход (PT2) при напряжениях $\sigma_{PT2}^{№1} \cong 7.12$ GPa, $\sigma_{PT2}^{№2} \cong 7.92$ GPa.

В закаленном сплаве (образец № 3) отмеченных фазовых переходов и остаточной намагниченности не наблюдалось.

Эффект возникновения остаточной намагниченности в ферромагнитных сплавах наблюдался при различных механических нагрузках [13–16]. Например, в [13,14] обнаружены фазовые переходы в никелевых суперсплавах после ударного нагружения с давлениями 20 GPa и 100 GPa. В работе [15] отмечалось возникновение намагниченности в стали 110Г13Л в результате воздействия динамических нагрузок, а в [16] изучался эффект техногенной намагниченности горных пород. Результаты этих исследований показали, что пластическая деформация и обусловленные ею эволюции структуры материалов определяют возможность фазовых переходов. Однако данных о пороговых значениях давлений магнитных фазовых переходов при ударных нагрузках в литературе практически не удается обнаружить.

Обнаруженный фазовый переход также может быть обусловлен структурными перестройками в сплаве, например, изменением соотношения $\alpha 1$ и $\alpha 2$ фаз, и сопровождающим их ориентационным магнитным переходом за счет возрастания энергии магнитного взаимодействия в локализованных полосах пластического сдвига. Детализация причин такого структурного магнитного перехода требует дополнительных достаточно обширных исследований.

Таким образом, влияние термообработки сказывается не только на количественных характеристиках прочности и пластичности (табл. 2), но и на возможности фазовых переходов при динамических нагрузках и их пороговых значениях.

Значительный интерес представляет вопрос о возможности ориентационного магнитного фазового перехода в сплавах системы Fe–Cr–Co в условиях статического нагружения.

К настоящему времени существует общепризнанное понимание того, что ориентационный магнитный фазовый переход неотделим от перестройки структуры материала, обусловленной, в частности, пластической деформацией, а также вкладом эффектов связанности магнитных полей и полей механических напряжений. В работах [17–19] показано, что практически всегда структурные фазовые переходы сопровождаются спин-переориентационными фазовыми переходами, а изменения в магнитной подсистеме, в свою очередь, могут приводить к изоструктурным фазовым переходам.

Однако при изучении механических свойств сплавов системы Fe–Cr–Co традиционными методами (прокатка, одноосное растяжение и т.д.), напряжения в которых не превышали $\sim 2-3$ GPa [3,4,20], не было обнаружено фазовых переходов. При этом отмечалось существенное увеличение доли ферромагнитной фазы с увеличением степени пластической деформации, что позволяет предполагать возможность ориентационного фазового перехода и при статических нагрузках.

Однозначный ответ на это вопрос требует проведения достаточно трудоемких исследований. Прочность таких материалов при статических нагружениях достаточно мала — предел прочности сплавов системы Fe–Cr–Co не превышает $\sim 2-3$ GPa, что в несколько раз ниже измеренных в нашей работе значений фазового перехода ($\sim 7-8$ GPa). При этом следует иметь в виду существенное отличие термодинамики статических и динамических испытаний — обычно изотермический процесс в первом случае и адиабатический во втором, что существенным образом может сказываться на вероятности и критических параметрах фазовых переходов.

4. Заключение

Исследования высокоскоростного деформирования магнито-твердого сплава Fe–Cr–Co позволили обнаружить структурный магнитный фазовый переход, индуцированный ударным импульсом, и определить пороговые

значения давлений (7–8 GPa) этого перехода. Измерения показали существенную неоднородность распределения остаточной намагниченности по поверхности образцов. При этом распределение намагниченности хорошо коррелирует с траекторией трещин в образце, что может говорить о связи процессов разрушения с процессами образования магнитных полей в образце.

Список литературы

- [1] M. Kaneko, M. Homma, T. Minowa. *IEEE Trans. Magn.* **12**, 6, 977 (1976).
- [2] T. Minowa, M. Okada, M. Homma. *IEEE Trans. Magn.* **16**, 3, 529 (1980).
- [3] И.М. Павлов, Г.Н. Мехед, Л.А. Кавалерова, И.М. Миляев, Ж.А. Васильева. В сб.: Пластическая обработка металлов и сплавов / Под ред. Н.В. Агеева. Наука, М. (1979). С. 213.
- [4] А.И. Миляев, Ю.К. Ковнеристый, С.П. Ефименко, Г.Ф. Корзникова. *Физика и химия обработки материалов* **3**, 86. (2003).
- [5] Y. Sudenkov, S. Atroshenko, I. Smirnov, N. Naumova, X. Sun. *Appl. Mech. Mater.* **566**, 542 (2014).
- [6] С.А. Атрошенко, Ю.В. Судьенков, Х.У. Сун, Н.Ф. Морозов, И.В. Смирнов, Н.С. Наумова. *Деформация и разрушение материалов* **8**, 2 (2014).
- [7] Ю.В. Судьенков, И.В. Смирнов. Патент РФ, № 2507498, 20.02.2014.
- [8] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *Rev. Sci. Instr.* **36**, 11, 1617 (1965).
- [9] J.R. Assay, L.M. Barker. *J. Appl. Phys.* **75**, 6, 2540 (1974).
- [10] Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. Л.В. Альтшулера и др. Наука, М. (2000). 425 с.
- [11] Б.Л. Глушак, В.Ф. Куропатенко, С.А. Новиков. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Наука, Новосибирск (1992). 292 с.
- [12] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортгов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Изд-во. Янус-К, М. (1996). 407 с.
- [13] Н.В. Казанцева, Н.И. Виноградова, М.Б. Ригмант, А.Н. Пирогов. *Деформация и разрушение металлов* **9**, 33 (2009).
- [14] Н.В. Казанцева, Б.А. Гринберг, Е.В. Шорохов, А.Н. Пирогов, Ю.А. Дорофеев. *ФММ* **99**, 5, 1 (2005).
- [15] В.В. Казанцева, Л.И. Квеглис. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии* **2**, 4, 376 (2009).
- [16] В.А. Тюремнов. *Вестник МГТУ* **10**, 2, 304 (2007).