

05.3;06.4

Повышенное уплотнение пористого алюминида никеля при ударном сжатии

© В.В. Якушев, А.В. Уткин, А.Н. Жуков

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия
E-mail: yakushev@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 1 июня 2022 г.

Принято к публикации 6 июня 2022 г.

С использованием лазерного интерферометра проведена регистрация волновых профилей в пористых (пористость 30%) образцах алюминида никеля. Получены данные по ударной сжимаемости. Обнаружено anomalно высокое уплотнение, проявляющееся в пересечении ударных адиабат сплошных и пористых образцов при давлении 28 GPa, которое указывает на наличие фазового превращения.

Ключевые слова: ударные волны, ударная адиабата, фазовые переходы, лазерные доплеровские интерферометры, интерметаллиды.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52870.19225

Алуминид никеля (NiAl) — это интерметаллид, известный своими уникальными механическими свойствами при высокой температуре [1]. Благодаря простой кристаллической структуре, высокоупорядоченной решетке, широкой области гомогенности на фазовой диаграмме и другим свойствам NiAl также представляет большой интерес для фундаментальных научных исследований [2].

Начало исследований NiAl при динамическом нагружении в 1990-х годах было, по-видимому, мотивировано необходимостью получения представлений о прочностных характеристиках этого перспективного для целей авиационного двигателестроения высокотемпературного материала [3]. Первой фундаментальной работой, в которой были проведены исследования динамической сжимаемости NiAl, является [3]. В качестве образцов использовался монокристаллический NiAl. Для их нагружения применялись стержни Хопкинсона. При этом амплитуда нагружения не превышала 2.5 GPa. В работе [4] максимальное давление в эксперименте составило 8 GPa. В [5] при нагружении поликристаллических образцов NiAl амплитуда нагружения достигала 83 GPa. Никаких особенностей поведения NiAl при динамическом сжатии в этих работах обнаружено не было, кроме потери упругости вблизи 1 GPa [3,5].

Указанные выше исследования проводились на монокристаллических и сплошных поликристаллических образцах. В то же время не меньший интерес представляет проведение экспериментов с пористыми образцами NiAl. В настоящее время данные по исследованию ударной сжимаемости пористого NiAl отсутствуют. Вместе с тем использование пористых образцов позволяет существенно расширить температурный диапазон в ударно-волновом эксперименте [6]. Это позволит проанализировать отклик NiAl на ударную нагрузку в более широкой области температур.

В настоящей работе экспериментально исследована ударная сжимаемость образцов NiAl с пористостью

30%. Образцы в форме таблеток диаметром 20 mm и толщиной 2–3 mm изготавливались путем прессования порошка NiAl с усилием 6.4 t/cm² и последующего спекания в вакууме ($1 \cdot 10^{-4}$ mm Hg) при температуре 1200–1250°C в течение часа. Плотность образцов составляла 4.16 ± 0.07 g/cm³, что соответствует пористости $29 \pm 1\%$. Методика изготовления и аттестации порошка NiAl описана в [5].

Высокое давление в образцах создавалось с использованием взрывных метательных устройств (рис. 1).

Продукты детонации заряда взрывчатого вещества разгоняли алюминиевую пластину-ударник 1, которая на заданном расстоянии достигала требуемой скорости. Ударник сталкивался с алюминиевым экраном 2 и ге-

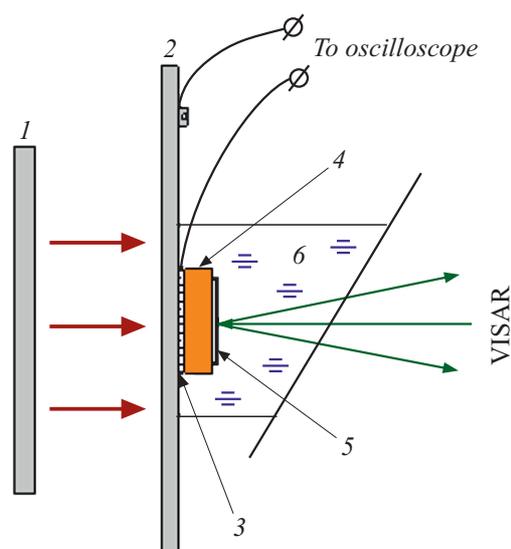


Рис. 1. Экспериментальная сборка. 1 — Al-ударник, 2 — Al-экран, 3 — поляризационный датчик входа ударной волны из экрана в образец, 4 — образец NiAl, 5 — Al- или Ti-фольга, 6 — водяное окно или воздух.

Параметры экспериментальныхборок в порядке увеличения давления нагружения образцов

Номер опыта	Скорость ударника, km/s	Толщина Al-ударника, mm	Материал экрана (толщина)	Толщина образца, mm	Плотность образца, g/cm ³	Материал фольги (толщина)	Окно
410	3.3	5	Cu (2 mm)	3.02	4.10	Al (0.01 mm)	Вода
411	3.3	5	Cu (2 mm)	3.01	4.14	Al (0.01 mm)	«
406	3.3	5	Al (4 mm)	3.03	4.10	Ti (0.20 mm)	Воздух
413	3.3	5	Al (4 mm)	3.02	4.13	Al (0.01 mm)	Вода
305	4.6	2	Al (2 mm)	3.16	4.13	Al (0.01 mm)	«
401	4.6	2	Al (2 mm)	1.90	4.13	Ti (0.20 mm)	Воздух

нерировал ударную волну в образце 4, наклеенном с противоположной стороны экрана. Момент входа ударной волны в образец определялся с помощью тонкого поляризационного датчика 3, располагавшегося на экране под образцом. Ударная волна распространялась по образцу и выходила на границу с водяным окном или с пустотой 6. При этом граница вместе с наклеенной на поверхность образца титановой или алюминиевой фольгой 5 начинала движение, а ее скорость измерялась с использованием лазерного интерферометра VISAR (velocity interferometer system for any reflector) [7]. Варьирование параметров нагружения осуществлялось за счет изменения массы заряда взрывчатого вещества и толщины ударника.

Параметры экспериментальныхборок представлены в таблице.

Ударная адиабата образцов определялась по методу „торможения“ [7]. Для определения времени прохождения ударной волны по образцу использовались метки времени: скачки на сигналах поляризационного датчика и осциллограмме VISAR. Обсчет осциллограмм VISAR давал профили скорости движения границы образец–водяное окно.

Регистрация профилей скорости лазерным интерферометром на границе пористого образца с прозрачной средой осложняется формированием кумулятивных микроструй, которые портят отражающую способность наклеенной на образец тонкой фольги. Подбор фольг по толщине и материалу является нетривиальной задачей, поэтому не во всех экспериментах удалось записать качественные профили скорости.

На рис. 2 представлен профиль скорости границы образец–водяное окно (сплошная линия), зарегистрированный в опыте № 413 (см. таблицу) при давлении ударного сжатия 30 GPa.

Профиль, представленный штриховой линией, зарегистрирован в эксперименте без образца, когда лазерный луч отражался непосредственно от границы экран–вода. Данный профиль дает представление о форме импульса, входящего в образец из экрана. На каждом профиле скорости видны ударный скачок, область постоянной скорости и спад, обусловленный приходом волны разгрузки с тыльной стороны ударника. Расстояние между

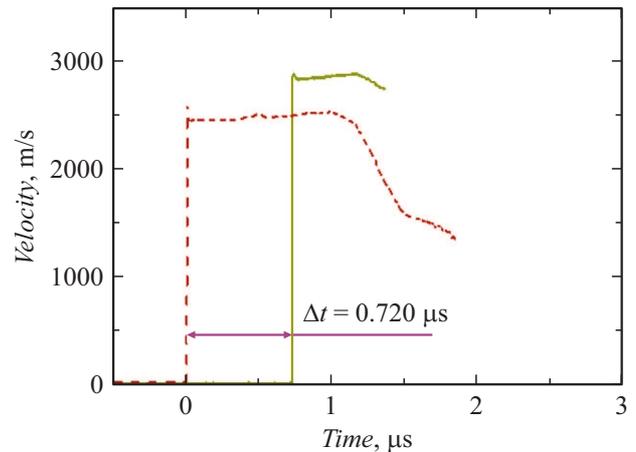


Рис. 2. Профиль массовой скорости на границе образца с водяным окном в опыте № 413 (сплошная линия).

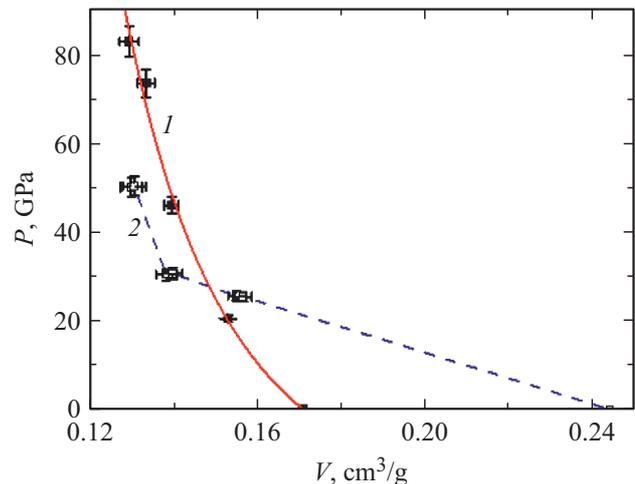


Рис. 3. Ударные адиабаты NiAl в координатах $P-V$. 1 — сплошные образцы [5], 2 — пористые образцы.

ударными скачками на рисунке соответствует времени прохождения ударной волны по образцу.

На рис. 3 приведены ударные адиабаты сплошного [5] и пористого (данные настоящей работы) NiAl в координатах $P-V$.

Как видно из рис. 3, ударная адиабата пористого NiAl пересекает таковую для сплошного NiAl при давлении 28 GPa. Очевидно, что такое пересечение невозможно, если вещество не претерпевает изменений структуры или состава, поскольку пористые материалы нагреваются сильнее в ударной волне и их ударная адиабата должна проходить выше таковой для сплошного вещества. Такое необычное поведение может быть объяснено фазовым переходом или, например, разложением NiAl. Однако образование NiAl из Al и Ni идет с уменьшением объема, а значит, высокое давление не может способствовать разложению этого соединения на Al и Ni. Возможность разложения NiAl с образованием других алюминидов никеля также маловероятна, поскольку, как следует из фазовой диаграммы системы Ni–Al, эти вещества менее устойчивы по сравнению с NiAl. Таким образом, наиболее вероятно прохождение фазового превращения. Оценка сверху степени уплотнения при фазовом переходе, сделанная путем экстраполяции верхней части ударной адиабаты пористого NiAl к нулевому давлению, показывает, что она достаточно велика и составляет около 10%.

Подобное пересечение ударных адиабат наблюдалось ранее в экспериментах с диоксидом кремния, карбидом бора, диоксидом урана и пятиокисью тантала [8]. В работе [9] данное явление обнаружено нами при ударном сжатии пористых образцов β -Si₃N₄. Оно было объяснено снижением порогового давления перехода в сверхтвердую фазу γ -Si₃N₄ вследствие более высокой температуры ударного сжатия пористых образцов. В [10,11] на основе расчетов повышенное уплотнение при ударном сжатии было предсказано для кремния при переходе в структуру β -Sn или близкую к ней орторомбическую модификацию. При этом утверждалось, что в явлении повышенного уплотнения определяющую роль играет сдвиговая деформация вблизи стенок пор, а разогрев существенно меньше, чем при ударном сжатии инертного пористого вещества.

Наряду с исследованием ударной сжимаемости большой интерес представляет установление структуры фазы высокого давления NiAl, на которую указывает повышенное уплотнение пористых образцов, а также возможность ее сохранения. В дальнейшем предполагается провести эксперименты при ударном сжатии в ампулах сохранения, а также получить точки на ударной адиабате пористого NiAl при давлениях ниже 20 GPa и выше 50 GPa.

Финансирование работы

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А19-119071190040-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Awotunde, O.O. Ayodele, A.O. Adegbenjo, A.M. Okoro, M.B. Shongwe, P.A. Olubambi, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, **104** (5), 1733 (2019). DOI: 10.1007/s00170-019-03984-9
- [2] D.B. Miracle, *Acta Met. Mater.*, **41** (3), 649 (1993). DOI: 10.1016/0956-7151(93)90001-9
- [3] S.A. Maloy, G.T. Gray, R. Darolia, *Mater. Sci. Eng. A*, **192-193** (Pt 1), 249 (1995). DOI: 10.1016/0921-5093(94)03256-4
- [4] K.J. McClellan, D.C. Swift, D.L. Paisley, A.C. Koskelo, *AIP Conf. Proc.*, **706**, 593 (2004). DOI: 10.1063/1.1780309
- [5] V.V. Yakushev, A.V. Utkin, A.N. Zhukov, S.Y. Ananey, A.Y. Dolgoborodov, D.O. Moskovskikh, *High Press. Res.*, **39** (3), 471 (2019). DOI: 10.1080/08957959.2019.1612389
- [6] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Наука, М., 1966), с. 555.
- [7] Ю.В. Батюков, В.А. Борисенко, В.М. Бельский, С.И. Герасимов, Б.Л. Глушак, М.В. Жерноклетов, А.Д. Ковтун, В.А. Комрачков, А.Л. Михайлов, М.А. Мочалов, Д.В. Назаров, О.А. Тюпанова, А.В. Федоров, *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках*, под общ. ред. М.В. Жерноклетова (РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров, 2003), с. 376. DOI: 10.53403/5951500435
- [8] D. Grady, G. Fenton, T. Vogler, *Int. J. Impact Eng.*, **56**, 19 (2013). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.07.006
- [9] V. Yakushev, A. Utkin, A. Zhukov, *AIP Conf. Proc.*, **1426**, 1529 (2012). DOI: 10.1063/1.3686574
- [10] J.M.D. Lane, A.P. Thompson, T.J. Vogler, *Phys. Rev. B*, **90** (13), 134311 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.134311
- [11] J.M.D. Lane, A.P. Thompson, T.J. Vogler, *AIP Conf. Proc.*, **1793**, 120010 (2017). DOI: 10.1063/1.4971692