

Аннотационный отчет о выполненной работе в рамках гранта Фонда поддержки молодых ученых ОИВТ РАН на 2014–2015гг по теме «Определение кинетики образования интерметаллидов NiAl и Ni₃Al при ударно-волновом нагружении в микросекундном диапазоне времен и давлениях до 100 ГПа»

В рамках данного проекта были начаты исследования закономерностей ударного сжатия смесей реакционноспособных компонентов, реагирующих с образованием твердых конечных продуктов.

Смесь микроразмерных компонентов

В задачи первого этапа исследований входили: лазерная регистрация профилей скорости границы экран – водяное окно и образец – водяное окно (входящая в образец и выходящая из него на границу с водяным окном ударные волны), определение скорости ударной волны в образце. По результатам анализа особенностей на зарегистрированных профилях ударных волн делались предположения относительно реакции между компонентами. Образцы из прессованной эквимолярной смеси порошков никеля и алюминия (Ni/Al – 68,5/31,5 вес. %) с характерными размерами частиц около 100 мкм представляли собой таблетки диаметром 30,4 мм и толщиной 2,905 мм и 4,278 мм (Плотность образцов составляла приблизительно 80% от плотности монолита. Для регистрации профилей массовой скорости использовался лазерный интерферометр VISAR, обладающий высоким пространственным и временным разрешением. Нагружение образцов производилось до давлений 7,4 ГПа (массовая скорость за ударной волной 0,66 км/с) и 34 ГПа (массовая скорость за ударной волной 1,62 км/с).

Явных особенностей (возрастания давления), связанных с реакцией между компонентами образца за время регистрации не наблюдается. Характерные осцилляции за ударным скачком, проявляющиеся в формировании пика, связаны с пористостью образцов, которая составляла около 20 %. Подъем скорости после пика, отчетливо выраженный при низком давлении, скорее всего связан с кинетикой схлопывания пор. Нельзя, однако, исключить и влияние энерговыделения за счет реакции исходных компонент. Но если последнее предположение справедливо, то следовало бы ожидать еще более интенсивный рост скорости с увеличением давления, чего, тем не менее, не наблюдается.

На втором этапе исследований было проведено измерение скорости звука за фронтом ударной волны в образцах в зависимости от давления нагружения. Скорость звука весьма чувствительна к процессам, происходящим в веществе при ударном сжатии. Идентифицировать эти процессы позволяет анализ особенностей на ее зависимости от давления нагружения. Определение скорости звука в ударно-сжатых образцах проводилось в аналогичной постановке экспериментов с тем отличием, что использовались более тонкие алюминиевые экраны (2 мм) и образцы большего диаметра (40,2 мм) чтобы исключить влияние боковых возмущений.

Смесь наноразмерных компонентов

Помимо образцов из смеси микропорошков также были проведены эксперименты с образцами из смеси нанопорошков, в которых реакция должна происходить более интенсивно. Для нагружения образцов использовались два типа взрывных метательных устройств, обеспечивающих давление сжатия приблизительно 9 и 30 ГПа. Образцы изготавливались из эквимолярной смеси порошков никеля и алюминия (Ni/Al – 68,5/31,5 вес. %) прессованием в стальных прессформах с усилием 8 т/см². Для приготовления микросмеси использовались промышленные порошки никеля и алюминия. Наночастицы никеля и алюминия получали в ИНЭПХФ РАН, г. Москва, на установке МИГЕН методом Гена-Миллера. Смешение порошков (около 5 минут) и механоактивация полученных наносмесей (около 5 минут) производилась в планетарной мельнице - "Активатор-2SL".

Продольная скорость звука (лагранжева) определялась по расстоянию между точками начала разгрузки на обоих профилях, которое принималось равным времени прохождения звука по сжатому образцу. Экспериментальные точки на зависимости скорости звука от давления, полученные в ударно-волновом эксперименте, не полностью отражают реальную картину, поскольку не учитывается взаимодействие падающих и встречных волн разгрузки. Из анализа конфигураций экспериментальныхборок можно заключить, что скорость звука при высоком

давлении более сильно занижена, чем при средних величинах давления. По всей видимости, реальная зависимость соответствует таковой для инертного сплошного материала и имеет вид плавно возрастающей кривой с выпуклостью вверх. Сопротивление схлопыванию пор в образцах теряется уже при относительно небольшом давлении, и вещество ведет себя как монолит. Более высокая скорость звука в нанобразцах может быть связана с бóльшим количеством жесткой оксидной пленки, покрывающей наночастицы, в сравнении с микрочастицами. Содержание оксида алюминия в образцах из наносмеси составляло около 9%, в то время как в образцах из микросмеси – около 2%. Также это может быть связано с существенно различной дисперсностью микро и нано смесей. Не исключено и влияние на скорость звука начала образования алюминидов никеля.

Ударная адиабата.

Построение ударных адиабат микро- и нанобразцов производилось по результатам определения в эксперименте скорости ударной волны. Вид ударных адиабат – практически линейные зависимости - свидетельствует об отсутствии каких-либо значительных изменений, происходящих с веществом при ударном сжатии. Закрывание пор происходит при относительно небольшом давлении, и вещество ведет себя как инертное сплошное. Скорость ударной волны в нанобразцах выше, чем в микрообразцах. Практически одинаковый наклон ударных адиабат, определяемый коэффициентом Грюнайзена, свидетельствует об одинаковой тепловой составляющей давления, несмотря на различие внутренней структуры образцов. В то же время, тот факт, что ударные адиабаты разнесены друг от друга, указывает на влияние структуры образцов на их упругие свойства. Ударная адиабата образцов из наносмеси проходит выше таковой для образцов из микросмеси. Это указывает на более высокую их жесткость. Данные экспериментов указывают на то, что если за время ударного сжатия смесей и происходит реакция между компонентами, то лишь в незначительной степени.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

К аннотационному отчету о выполненной работе по теме «Определение кинетики образования интерметаллидов NiAl и Ni₃Al при ударно-волновом нагружении в микросекундном диапазоне времен и давлениях до 100 ГПа».

Перечень публикаций и выступлений на конференциях по теме проекта за период: IV квартал 2014 - III квартал 2015.

Статьи:

1. 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 // In: *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, November 2015, in print.

Тезисы:

1. С.Ю. Ананьев, А.А. Дерибас, А.А. Дроздов, А.Е. Морозов, К.Б. Поварова, Б.Д. Янковский Структурные преобразования в смеси микронных порошков Ni и Al при импульсном обжатии в цилиндрических ампулах сохранения // *Труды 57-й научной конференции МФТИ* Москва: МФТИ, Россия, 24–29 ноября 2014, с.117.
2. Ananev S.Yu., Yankovsky B.D., Deribas A.A., Drozdov A.A., Dolgoborodov A.Yu. Pulse compression of the Ni and Al micron powders mixture in cylindrical recovery ampoules // In: *Abstracts of the XXX International Conference on "Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter"*, Elbrus, Russia, March 1-6, 2015, P.83.
3. Ананьев С.Ю., Мазес М., Ли Я., Валдбок Дж., Доссот М., Дево К., Мак Рай Э., Солдатов А.В. Структурная стабильность одностенных и двустенных углеродных нанотрубок при динамическом сжатии // *Сборник тезисов Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»*, Саров, Россия, 23-27 марта 2015.

Выступления:

1. С.Ю. Ананьев, А.А. Дерибас, А.А. Дроздов, А.Е. Морозов, К.Б. Поварова, Б.Д. Янковский Структурные преобразования в смеси микронных порошков Ni и Al при импульсном обжатии в цилиндрических ампулах сохранения // *57-ая научная конференция МФТИ* Москва: МФТИ, Россия, 24–29 ноября 2014
2. Ananev S.Yu., Yankovsky B.D., Deribas A.A., Drozdov A.A., Dolgoborodov A.Yu. Pulse compression of the Ni and Al micron powders mixture in cylindrical recovery ampoules // *XXX International Conference on "Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter"*, Elbrus, Russia, March 1-6, 2015.