

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И КОМПАКТИРОВАНИЯ СПЛАВА АМГ-6

*Скляднева Татьяна Олеговна (postmaster@ifv.vniief.ru), Брагунец Вячеслав Алексеевич, Гнутов Иван Сергеевич, Калашников Денис Александрович, Подурец Алексей Михайлович, Симаков Владимир Геннадьевич, Терешкина Ирина Анатольевна, Ткаченко Михаил Игоревич, Трунин Иван Рюрикович, Федоров Алексей Викторович, Финюшин Станислав Александрович, Шестаков Евгений Евгеньевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлен экспериментально-расчетный метод исследования откольного разрушения и компактирования металлов. Метод включает проведение экспериментов с использованием нагружающего устройства пушечного типа, измерение волновых течений с помощью комплекса АК ЛОГИН на основе метода PDV, постопытный анализ образцов с помощью комплекса металлографической обработки, а также проведение модельных расчетов по численной программе, содержащей перспективные модели поведения сред. Полный цикл исследований проведен с образцами из алюминиевого сплава АМг6.

**Ключевые слова:** экспериментально-расчетный метод, откольное разрушение, компактирование, металлография.

## EXPERIMENTAL-NUMERICAL INVESTIGATION OF SPALL FRACTURE AND COMPACTION OF AMG-6 ALLOY

*Sklyadneva Tatyana Olegovna (postmaster@ifv.vniief.ru), Bragunets Vyacheslav Alekseyevich, Gnutov Ivan Sergeevich, Kalashnikov Denis Aleksandrovich, Podurets Aleksey Mikhailovich, Simakov Vladimir Gennadyevich, Tereshkina Irina Anatolyevna, Tkachenko Mikhail Igorevich, Trunin Ivan Ryurikovich, Fedorov Aleksey Viktorovich, Finyushin Stanislav Aleksandrovich, Shestakov Evgenii Evgenyevich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The authors present an experimental-numerical method for investigation of spall fracture and compaction of metals. The method includes conduction of tests with use of a gun-type loading device, measurement of wave flows by AK LOGIN facility based on the PDV method, post-experimental analysis of samples employing a facility for metallographic processing, as well as conduction of model calculations by numerical program containing promising models of media behaviors. Total investigation cycle was performed with samples of aluminum alloy AMg6.

**Keywords:** experimental-numerical method, spall fracture, compaction, metallography.

### Введение

Фундаментальные исследования поведения материалов при динамических импульсных нагрузках находят применение во многих практических приложениях, связанных с высокоэнергетическими процессами. Большое значение имеет решение вопросов обеспечения безопасного функционирования конст-

рукций и создания средств их защиты от разрушающих воздействий взрыва, высокоскоростного удара или быстрого объемного разогрева, а в ряде практических задач, напротив, требуется организовать управляемый целенаправленный процесс разрушения.

Создание новых материалов, а также качество и соответствие требуемым нормам материалов, ис-

пользуемых при разработке конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения, выдвигают на первый план вопросы исследования их статических и динамических механических свойств.

Специфическими особенностями динамического нагружения образцов, имеющих контактные или свободные границы, являются распространение волн, их взаимодействие с границами и друг с другом и образование внутри тела конечных областей возмущений напряженно-деформированного состояния (НДС), которое может привести к структурным изменениям материала, появлению дефектов и разрушению. Такой тип разрушения называется откольным разрушением, которое, в общем случае, вызывается развитием кратковременных растягивающих напряжений внутри тела, образованных взаимодействием встречных волн расширения.

Поскольку отсутствует принципиальная возможность корректных измерений параметров состояния вещества во время протекания откольного разрушения, для описания его закономерностей и особенностей в последнее время все чаще используется совместный метод, включающий результаты физического и численного экспериментов. Подобное сочетание, как показывает практика, дает возможность построить достаточно полную и достоверную картину происходящих процессов.

В настоящей работе рассмотрены основные аспекты экспериментально-расчетного метода исследования откольного разрушения и компактирования металлов, подвергнутых ударно-волновому воздействию. Метод включает проведение экспериментов с использованием нагружающего устройства пушечного типа, измерение волновых течений с помощью комплекса АК ЛОГИН на основе метода PDV [1], постопытный анализ образцов с помощью комплекса металлографической обработки.

В докладе также приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей, полученных в опытах со сплавом АМг6.

### Откольное разрушение

В исследованиях откольного разрушения преследуются две цели:

1. На основании физического эксперимента необходимо получить количественную характеристику откольного разрушения: откольную прочность – значение растягивающего напряжения, при котором материал разрушается, и определить степень разрушения образца;

2. На основании численного эксперимента построить математическую модель, использование которой должно воспроизвести имеющиеся экспериментальные данные, и получить дополнительную информацию о процессе разрушения.

Первая цель достигается путем регистрации волновых процессов внешними по отношению к внутренним разрушениям образца датчиками и ме-

таллографическими исследованиями структуры сохранных после опытов образцов.

Вторая цель предполагает применение адекватных, физически обоснованных моделей деформирования, разрушения и компактирования, которые позволят проводить численные модельные расчеты процессов ударно-волнового воздействия на исследуемые материалы.

Рассмотрим на примере опытов с ударным нагружением образцов из сплава алюминия АМг6 применение экспериментально-расчетного метода определения характеристик откольного разрушения и компактирования металлов.

Схема постановки экспериментов на откольное разрушение образцов из АМг6 приведена на рис. 1.

В опытах разгон ударника осуществлялся в стволе легкогазовой пушки калибром 40 мм, регистрация массовой скорости движения границы образец-подложка из оргстекла проводилась методом PDV. В каждом опыте образцы сохраняли, проводили их металлографический анализ, а также сохраненные образцы с выбранным внутренним повреждением использовали в опытах на компактирование.

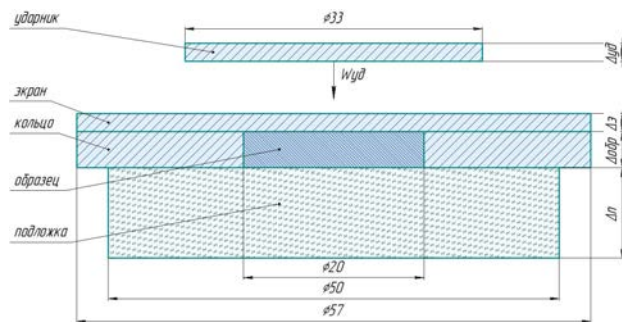


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки

Образцы были изготовлены из прутка. Вся остальная оснастка сборки (экран, кольцо, ударник) – также из сплава АМг6 кроме подложки, которая в опытах на откол была из оргстекла.

Предварительно исследовали исходную структуру материала, в которой выявили особенности, связанные с ориентацией зерен, наличием включений, микродефектов, примесей и т. п. На рис. 2 представлена фотография шлифа поперечного среза образца из АМг6, на котором проявляются вытянутая направленная структура без четкого выделения границ зерен и наличие включений в виде черных точек, которые характеризуют присутствие примесей в сплаве (%: Mg – 6,8, Fe – 0,4, Mn – 0,55, Si – 0,2, Be – 0,003, Ti – 0,04) [2].

Плотность АМг6 составляет  $(2,62 \pm 0,02)$  г/см<sup>3</sup>, объемная скорость звука ( $c_0$ ) – 5,334 км/с, продольная ( $c_L$ ) – 6,487 км/с и поперечная ( $c_t$ ) – 3,197 км/с.

Два опыта на откольное разрушение образца из АМг6 были проведены по схеме, приведенной на рис. 1. В этих опытах толщины ударника  $\Delta_{уд} = 2$  мм,

экрана  $\Delta_3 = 2$  мм, образца  $\Delta_{обр} = 4$  мм, измеренная скорость соударения  $W_{уд} \sim 440$  м/с. К тыльной поверхности образца крепились подложка из оргстекла толщиной 10 мм. В экспериментах с помощью комплекса АК ЛОГИН регистрировалась скорость движения границы раздела образец–подложка  $U(t)$ .

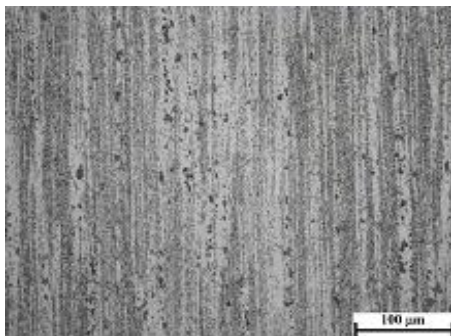


Рис. 2. Фотография шлифа среза прутка из АМГб при увеличении 200Х

На рис. 3 приведены обработанные экспериментальные спектрограммы в виде зависимостей  $U(t)$ , на которых зафиксированы упругий предвестник и откольный сигнал – выход на границу раздела ударной волны, сформированной в зоне поврежденности образца.

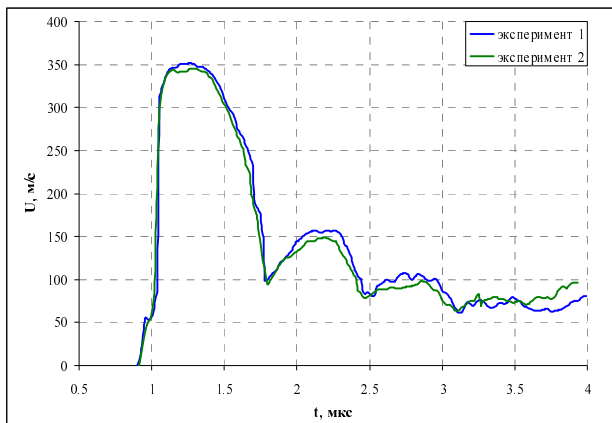


Рис. 3. Скорость границы раздела образец–подложка (АМГб–оргстекло)

Количественную оценку значения откольной прочности  $\sigma_{отк}$  по экспериментальным зависимостям  $U(t)$  (скорость на границе раздела сред) можно сделать по формулам, приведенным в [3]. Для рассмотренного опыта  $\sigma_{отк} \sim 1,2$  ГПа.

### Металлографический анализ сохраненных образцов

Метод металлографического анализа откольного разрушения позволяет определять степень (микроили макроразрушение), характер разрушения (вязкий или хрупкий), выявлять изменения во внутренней

структуре материала образца, а также дать оценку количественных величин концентрации и размеров дефектов, ширины зоны разрушения, координаты сечения с максимальным уровнем поврежденности и т. д.

Один из сохраненных в опытах образцов был разрезан, была исследована структура его поперечного среза, визуально определены характер разрушения и степень разрушения.

На рис. 4 приведена фотография шлифа, полученная при увеличении 50Х.



Рис. 4. Фотография шлифа поперечного среза образца из АМГб

Как видно на фотографии, четко выделяется зона, где образовались дефекты. Дефекты расположены практически на одной линии в центре сечения образца ширина зоны разрушения  $h = 0,322$  мм, координата сечения образца, где поврежденность достигает максимального значения,  $x_c = 2$  мм.

### Результаты численного моделирования экспериментов с АМГб

Полученные экспериментальные результаты сравнивались с результатами модельного расчета, выполненного по одномерной программе [4] с использованием моделей деформирования и разрушения из [5],[6].

Развитие поврежденности во внутренних сечениях образца показано на рис. 5, где представлены распределения поврежденности  $\omega$  по толщине образца в различные моменты времени действия растягивающего напряжения вплоть до момента времени 2,2 мкс, когда полностью сформировалась дефектная структура материала.

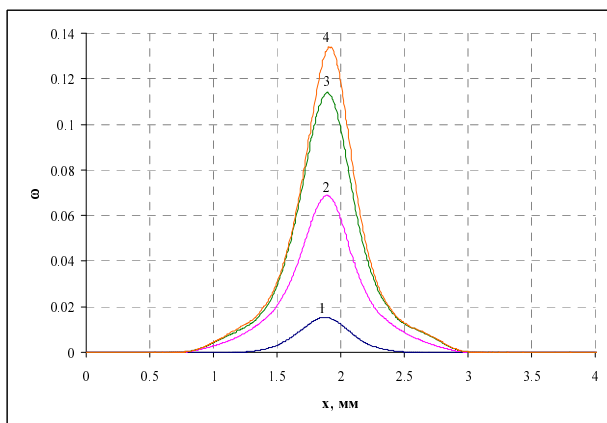


Рис. 5. Динамика развития поврежденности: 1 – 1,6 мкс, 2 – 1,8 мкс, 3 – 2,0 мкс, 4 – 2,2 мкс

По расчетным зависимостям  $\omega(x)$  определили ширину зоны разрушения  $h \approx 0,45$  мм, координату сечения, где поврежденность достигает максимального значения,  $x_c \sim 1,95$  мм. Все полученные в расчетах значения хорошо согласуются с результатами обработки экспериментальных данных ( $h_{\text{экс}} = 0,322$  мм,  $x_{\text{экс}} = 2$  мм).

Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей массовой скорости  $U(t)$ , приведенных на рис. 6, также демонстрирует их хорошее согласие.

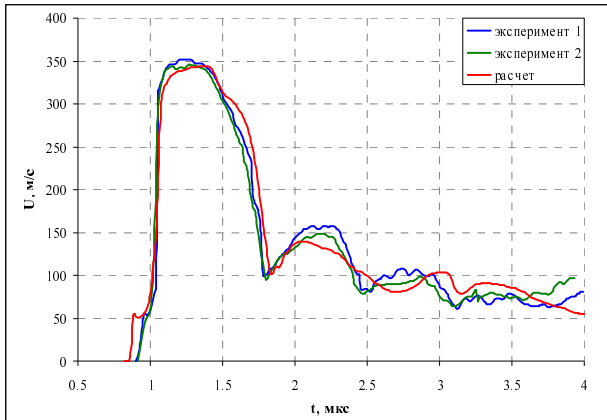


Рис. 6. Зависимости массовой скорости от времени

На рис. 7 показана расчетная временная зависимость растягивающего напряжения, возникающего при взаимодействии волн разгрузки в сечении образца, где формируется максимум распределения поврежденности  $\omega(x)$ . Максимальная величина растягивающего напряжения (откольная прочность), согласно расчету, составляет  $\sigma_{\text{отк}} \sim 1,19$  ГПа (значение  $\sigma_{\text{отк}}$ , определенное по экспериментальным зависимостям, составило 1,2 ГПа).

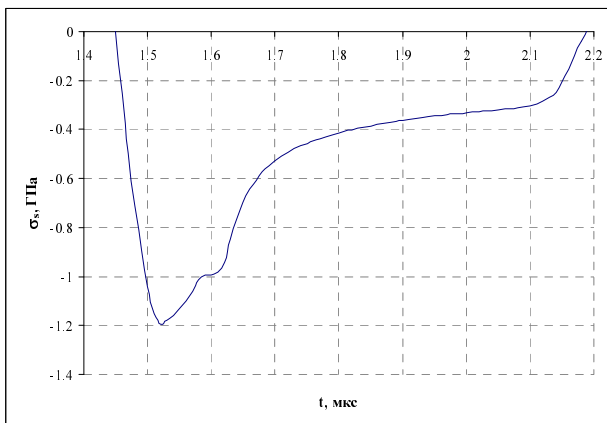


Рис. 7. Зависимость растягивающего напряжения от времени в сечении, где  $\omega = \omega_{\text{max}}$

Представленный в первом разделе доклада экспериментально-расчетный подход успешно применяется при исследовании откольного разрушения металлов. На основании такого подхода определены значения откольной прочности большого количества металлов, построены модели откольного разрушения, и проведены модельные расчеты экспериментов.

Что же касается исследований процесса компактирования поврежденности («залечивания») внутренней дефектной структуры) материалов, то они начали развиваться лишь в последние несколько лет. Первые результаты таких работ опубликованы в [7], [8], [9], где на разных металлах отработаны методология получения опытной информации о процессе компактирования и расчетный подход к численному описанию экспериментов.

### Экспериментальное исследование компактирования металлов

Метод исследования компактирования поврежденных образцов, предложенный в [7], [8, 9], предполагает проведение экспериментов в два этапа. На первом этапе проводится серия опытов, где в образцах из исследуемых материалов создается внутренняя поврежденность – опыты на откольное разрушение. На втором этапе сохраненные образцы с внутренней поврежденностью повторно нагружаются ударной волной. Таким образом, предварительно разрушенный образец будет компактироваться (будут «залечиваться» внутренние повреждения) проходящей ударной волной.

Рассмотрим процесс компактирования образца из АМгб, имеющего внутреннюю откольную поврежденность, как показано на рис. 4. Напомним, что один из испытанных на откольное разрушение образцов был сохранен и после незначительной механической доработки использовался в опыте на компактирование. Схема постановки опыта на компактирование была аналогична схеме экспериментов на откольное разрушение (рис. 1),  $W_{\text{уд}} = 440$  м/с,  $\Delta_{\text{обр}} = 3,84$  мм (после доработки). Отличие состояло в замене подложки из оргстекла, размещенной за образцом, на комбинированную слойку, состоящую из слоя алюминия толщиной 1,5 мм и следующего за ним слоя из оргстекла толщиной 10 мм. Такое изменение позволило исключить возможность повторного откольного разрушения в зоне предполагаемого компактирования, сдвинув плоскость откола к тыльной поверхности образца, и при этом провести регистрацию волнового течения в образце с поврежденностью. Образец в опыте сохранили, затем разрезали по диаметру и исследовали шлиф его поперечного сечения.

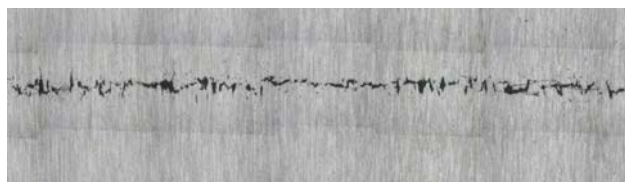
На рис. 8 представлена фотография фрагмента сечения образца, где обозначены слабо выраженная зона откольного разрушения, расположенная на глу-

бине  $\sim 1,2$  мм от границы образец – подслоем, и зона «залеченной» поврежденности в центре образца.

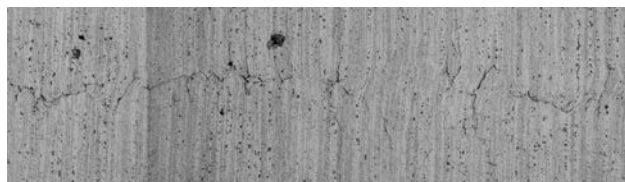


Рис. 8. Фотография фрагмента поперечного сечения сохраненного образца

В результате воздействия ударной волны произошло практически полное компактирование («залечивание») изначально дефектной структуры образца. Как показано на рис. 9, цепочка дефектов превратилась в узкую полосу, ширина которой много меньше среднего размера дефекта.



а



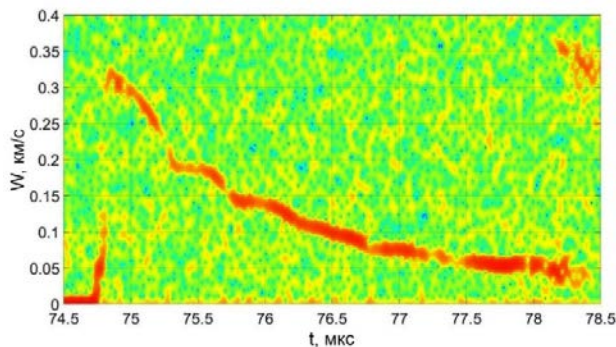
б

Рис. 9. Фотографии фрагментов поперечных сечений образцов: а – начальная поврежденность, б – после компактирования

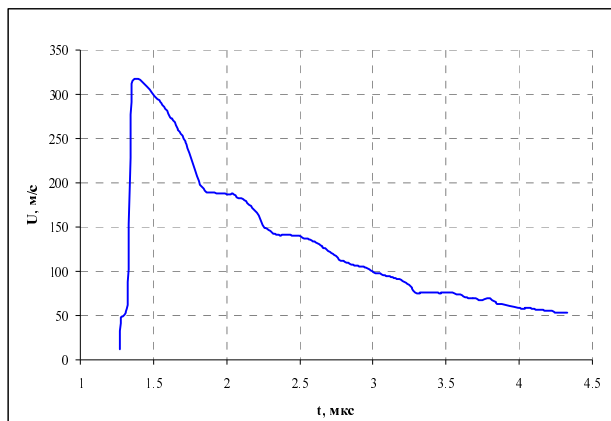
Зарегистрированная с помощью метода PDV спектрограмма и полученная после ее обработки зависимость скорости контактной границы алюминий-оргстекло приведены на рис. 10.

Как следует из рис. 10, особенностей на зависимости  $U(t)$ , связанных с изменением волнового движения из-за компактирования внутренней поврежденности образца, не видно: регистрируется упругий предвестник, нарастающий фронт ударной волны, реверберации откольного импульса. Единствен-

ное, что можно отметить, отсутствие стационарного участка на максимуме зависимости  $U(t)$ , уменьшение значения максимума скорости, по сравнению с опытами на откольное разрушение и низкий уровень повторной откольной поврежденности. Но, видимо, это связано с изменившейся геометрией сборки по сравнению с опытами на откол при сохранившихся условиях ударного нагружения.



а



б

Рис. 10. Зависимость скорости контактной границы алюминий-оргстекло: а – экспериментальная спектрограмма, б – обработка экспериментальной спектрограммы

Модельные расчеты эксперимента по компактированию алюминия проводились по одномерной программе КПД-1 Д [4] с использованием УРС, моделей деформирования и разрушения, которые применялись при моделировании опытов на откольное разрушение, а также модели компактирования из [10].

На рис. 11 приведены результаты сравнения модельных расчетов, выполненных для варианта отсутствия внутренней поврежденности в нагружаемом образце и варианта с внутренней поврежденностью с экспериментом, представленным на рис. 10.

«Залечивание» поврежденности демонстрируется на рис. 12, где показана динамика уменьшения поврежденности в образце из АМг6. Согласно расчетам при нагружении поврежденного образца ударной волной амплитудой  $\sim 3,2$  ГПа, образец полностью залечивается ( $\omega = 0$ ).

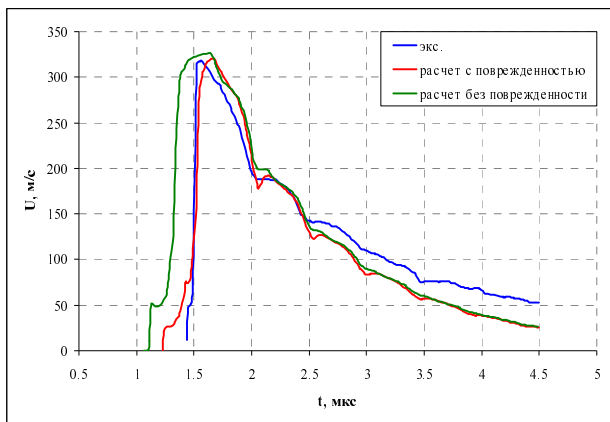


Рис. 11. Зависимости массовой скорости от времени

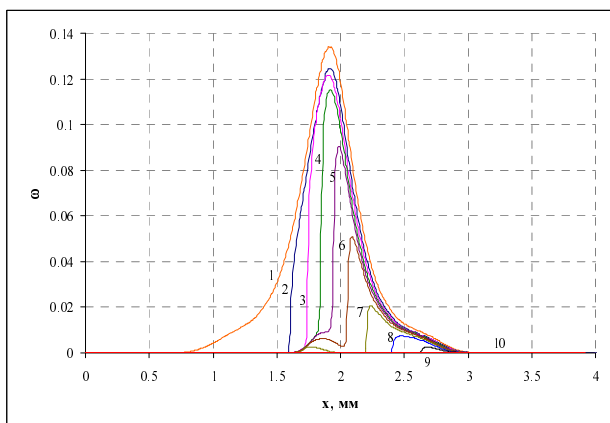


Рис. 12. Распределение поврежденности по толщине образца в различные моменты времени: 1 – начальная поврежденность, 2 – 0,65 мкс, 3 – 0,7 мкс, 4 – 0,75 мкс, 5 – 0,8 мкс, 6 – 0,85 мкс, 7 – 0,9 мкс, 8 – 0,95 мкс, 9 – 1 мкс, 10 – конечная поврежденность

### Заключение

Представлен экспериментально-расчетный подход, который позволяет более детально рассмотреть процессы разрушения и компактирования ударно-нагруженных веществ и возможности моделирования этих процессов. Показано, что при использовании такого подхода можно определить величину максимального растягивающего напряжения (откольная прочность) в зоне разрушения; количественные характеристики поврежденности (общая поврежденность образца, ширина зоны разрушения, координата сечения образца, где поврежденность достигает максимального значения); уровень нагружения, при котором происходит компактирование поврежденного образца, получить дополнительную информацию о процессах компактирования и откольного разрушения, а также дать рекомендации о применимости используемых теоретических подходов и расчетных моделей для моделирования работы сложных конструкций.

В первой серии экспериментов для алюминиевого сплава АМГ-6 получено значение откольной прочности  $\sigma_{отк} \sim 1,2$  ГПа. Дефекты расположены на одной линии в центре сечения образца. Откольная прочность, согласно расчету, составляет  $\sigma_{отк} \sim 1,19$  ГПа.

В опыте на компактирование в результате воздействия ударной волны произошло практически полное «залечивание» изначально дефектной структуры образца. Цепочка дефектов превратилась в узкую полосу. Согласно расчетам, при нагружении поврежденного образца ударной волной амплитудой  $\sim 3,2$  ГПа, образец полностью залечивается ( $\omega = 0$ ).

### Список литературы

1. Невозмущающие методы диагностики быстротекущих процессов. Под ред. д.т.н. Михайлова А. Л. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 322.
2. Mokrushin S. S., Karnaukhov E. I., Malugina S. N., Pavlenko A. V., Kazakov D. N., Kozelkov O. E. Research of dynamic properties of AMg6BM and AMg6M in shock-wave experiment on a gas gun // ДУМАТ. 2015.
3. Романченко В. И., Степанов Г. В. Зависимость критических напряжений от временных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали // ПМТФ. 1980. № 4. С. 141–147.
4. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3 (11). С. 11–14.
5. Гилман Д. Д. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии // Пер. с англ. Механика. 1970. Т. 120, № 2. С. 96–124.
6. Seaman L., Curran D. R., Shockey D. A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, № 1. P. 4814–4826.
7. Трунин И. Р., Терешкина И. А., Симаков В. Г. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование откольного разрушения и компактирования алюминия // ФГВ. 2014. Т. 50, № 6. С. 109–113.
8. Трунин И. Р., Терешкина И. А., Симаков В. Г. и др. Способы определения давления компактирования поврежденной меди // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2014. Вып. 2. С. 20–32.
9. Трунин И. Р., Терешкина И. А., Симаков В. Г. и др. Компактирование меди и стали при ударном нагружении // Тр. межд. конф. XVII Харитоновские тематические научные чтения Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 453–460.
10. Подурец М. А. Термодинамическая модель пористого тела // Математическое моделирование. 1996. Т. 8, № 2. С. 29.