

**СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ МЕДИ**

**И. Р. Трунин<sup>1,2</sup>, И. А. Терешкина<sup>1,2</sup>, А. М. Подурец<sup>1,2</sup>, В. Г. Симаков<sup>2</sup>, В. А. Брагунец<sup>2</sup>,  
И. Н. Кондрохина<sup>2</sup>, А. В. Воронин<sup>2</sup>, А. Н. Баландина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>СарФТИ НИЯУ «МИФИ», 607186, г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Выполнен полный цикл работы по исследованию откольного разрушения и компактирования медных образцов, включающий проведение экспериментов и металлографический анализ сохраненных образцов, проведение численных модельных расчетов и сравнение результатов численного моделирования и опытных данных.

*Ключевые слова:* откольное разрушение, поврежденность, пористая медь, компактирование, металлографический анализ.

**Введение**

Расчетное описание ударно-волновых явлений в средах с учетом процессов сжатия, растяжения, изменения прочности, разрушения и т. д. остается в настоящее время актуальной задачей.

И если для большинства указанных процессов построены модели уравнений состояния, определяющие уравнения сдвиговой прочности, модели откольного разрушения, то модели компактирования остаются пока на стадии их отработки. И здесь, в первую очередь, важным является не вид математической записи модели, а определение входящих в модель параметров.

В работе рассматриваются два способа оценки одного из основных параметров, входящего во все известные модели компактирования – давления компактирования. Давление компактирования – это граничное значение давления, при котором порошкообразный материал становится сплошным, а в поврежденном образце «залечиваются» внутренние дефекты.

На основании экспериментально-расчетного исследования ударной сжимаемости пористых образцов (первый способ) строилась модель сжатия (компактирования) пористого вещества, которая легла в основу модели компактирования поврежденной среды. Определению параметров этой модели для меди посвящен второй способ, который

был ранее предложен и отработан авторами на образцах из алюминия [1].

**1. Определение давления компактирования поврежденной меди по результатам исследования ударной сжимаемости пористой меди**

Для решения задачи компактирования поврежденной среды представим поврежденную среду как пористую, состоящую из сплошного вещества – матрицы и пор, и предположим, что материал становится пористым в результате волновых процессов, произошедших в первоначально сплошной среде. Тогда исследование процесса компактирования поврежденной среды сводится к изучению ударной сжимаемости пористого материала в области низких давлений, когда поры нельзя считать полностью закрытыми. В этой области малых давлений процесс сжатия пористых тел отличается от сжатия идеально пористого тела. Напомним, что в случае идеально пористого тела ударные адиабаты центрируются к начальной плотности сплошного вещества ( $\rho_0$ ), и в холодном пористом теле компактирование (закрытие пор) может быть осуществлено при нулевом давлении. В отличие от идеально пористого тела ударные адиабаты реальных пористых веществ при малых давлениях

центрируются к их начальной плотности  $\rho_{00} < \rho_0$ , и дожатие пористого вещества до сплошного происходит при конечном, отличном от нуля, значении давления, которое называют давлением компактирования.

Широко известны классические работы по изучению сжимаемости пористых тел с целью получения информации об уравнении состояния веществ [2].

В современных моделях уравнения состояния обычно предполагается, что давление и внутренняя энергия могут быть разделены на упругие (холодные) и тепловые составляющие.

Исследования поведения пористых образцов при достаточно больших давлениях используются главным образом для получения информации о тепловых составляющих уравнения состояния, в частности, о таком важном параметре, как параметр Грюнайзена.

Область низких давлений представляет особый интерес, в том числе и с практической точки зрения, например, при исследовании динамического компактирования предварительно разрушенных и порошкообразных материалов.

В основе современного моделирования свойств пористых тел лежат следующие основные предположения [3]: пористость  $k = \frac{\rho_s}{\rho}$  (отноше-

ние плотности матрицы к плотности пористого вещества) является функцией только давления и не зависит от температуры; поры не дают вклада во внутреннюю энергию, т. е.  $E = E_s$ , где  $E_s$  – энергия матрицы. На этих предположениях строилась, например, « $p - \alpha$ » модель [4].

Однако, как было показано в [5], совокупность этих двух предположений влечет за собой как следствие нарушение второго начала термодинамики. На самом деле, наибольшие сомнения вызывает предположение о равенстве энергий  $E = E_s$ , поскольку кроме внутренней энергии матрицы в пористом теле даже в условиях отсутствия сдвиговой компоненты упругой деформации среды, в целом, присутствует сдвиговая энергия, которая возникает, например, в результате микросдвигов в местах касания пор.

В отличие от « $p - \alpha$ » модели в термодинамической модели [5] дается другое определение внутренней энергии пористого тела. Согласно [5] новая энергия зависит и от уравнения состояния матрицы, и от функции пористости  $k(P)$  и имеет вид:

$$E = kE_s + \int_{P_c}^P \frac{dP}{P} W_s, \quad (1)$$

где  $W_s$  – энтальпия матрицы,  $P_c$  – давление компактирования (закрытия пор).

Если в качестве уравнения состояния матрицы использовать уравнение состояния типа Ми–Грюнайзена с простейшими зависимостями холодных давления  $P_{xs}(\delta_s)$  и энергии  $E_{xs}(\delta_s)$  от плотности (или от сжатия матрицы  $\delta_s$ ) и с зависимостью тепловой энергии  $E_{Ts}$  только от температуры:

$$P_s = P_{xs} + P_{Ts} = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1) + \Gamma \rho_0 \delta E_{Ts}, \quad (2)$$

$$E_s = E_{xs} + E_{Ts} = \frac{c_0^2}{n} \left( \frac{1}{n-1} \delta^{n-1} + \frac{1}{\delta} - \frac{n}{n-1} \right) + E_{Ts}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность матрицы,  $c_0$  – начальная объемная скорость звука,  $\Gamma$  – параметр Грюнайзена (постоянный), то энтальпия матрицы имеет вид:

$$W_s = \frac{c_0^2}{n-1} (\delta^{n-1} - 1) + (\Gamma + 1) E_{Ts}.$$

Теперь остановимся на выборе функции пористости  $k(P)$ . Функция пористости, характеризующая сопротивляемость пор сжатию, должна обладать следующими свойствами. Это падающая функция давления от значения  $k = k_0 > 1$  при  $P = 0$  до  $k = 1$  при  $P = P_c$ . Производная функции  $k(P)$  входит под знак интеграла в выражении для энергии пор (1). Поэтому желательно иметь функцию пористости такой, чтобы интеграл вычислялся в конечном виде. Иначе, при расчетах течений (например, расчетах задач компактирования) в каждой точке на каждом временном шаге интеграл пришлось бы считать численно, используя приближенные вычислительные методы, что усложнило бы расчет задачи.

Простейшей и удовлетворяющей всем перечисленным выше условиям функцией является квадратичная:

$$k(P) = 1 + (k_0 - 1) \left( 1 - \frac{P}{P_c} \right)^2, \quad (4)$$

где  $k_0$  – начальная пористость.

Таким образом, выбрав уравнение состояния матрицы и функцию пористости  $k(P)$ , можно разделить энергию и построить ударную адиабату.

### 1.1. Построение ударных адиабат пористой меди

С энергией в виде (1) и с квадратичной функцией пористости (4) была разработана процедура расчета ударных адиабат пористых материалов [5], реализованная в специальной численной программе.

Для построения ударных адиабат пористой меди воспользовались экспериментальными данными по определению параметров ударного сжатия пористых образцов в области давлений компактирования  $P_c$ , т. е. в области тех минимальных давлений, при которых на адиабате заданной пористости плотность при ударном сжатии наиболее близка к нормальной [6–8].

Следует отметить, что экспериментов в интересующей нас области нагружения оказалось не слишком много как для меди, так и для других веществ.

На рис. 1–5 изображены расчетные ударные адиабаты сплошной ( $k_0 = 1$ ) и пористой меди для различных значений начальной пористости  $k_0$ , которые сравниваются с экспериментальными данными ( $P, \rho$ ) из работ [6–8].

В расчетах использовались следующие параметры уравнения состояния (2), (3):  $\rho_0 = 8,93 \text{ г/см}^3$ ,  $c_0 = 3,9 \text{ км/с}$ ,  $n = 5,16$ ,  $\Gamma = 1,96$ . Поскольку ударные адиабаты строятся в области малых давлений и, следовательно, температур, будет достаточно использовать параметры УРС при нормальных условиях. При высоких температурах (большие пористости и давления) коэффициент Грюнайзена  $\Gamma$  проявляет тенденцию к уменьшению, поэтому его значение корректировалось для  $k_0 > 2$ .

Параметры функции пористости  $P_c$  и  $k_0$  определяются непосредственно из наилучшего описания расчетами экспериментальных данных.

Известно, что в окрестности давления  $P_c$  адиабаты меняют наклон с положительного (на первом участке – до давлений  $P_c$ ) до отрицательного (при  $k > 2$ ) при больших давлениях. Отсюда вытекает способ определения давлений  $P_c$ : увеличивая в экспериментах давление (с минимального) и определяя плотность сжатого вещества, находится точка или окрестность, где адиабата меняет наклон. Это и будет давлением компактирования, которое, как будет показано ниже, зависит от начальной пористости.

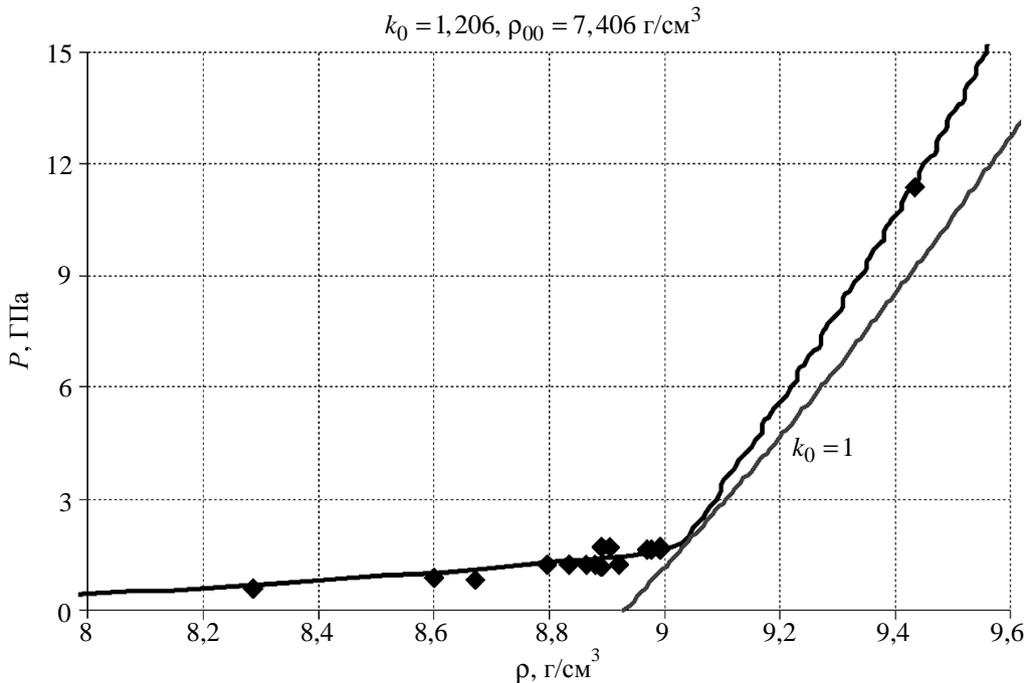


Рис. 1. Расчетная ударная адиабата пористой меди ( $k_0 = 1,206$ ), сплошной меди ( $k_0 = 1$ ) и экспериментальные данные

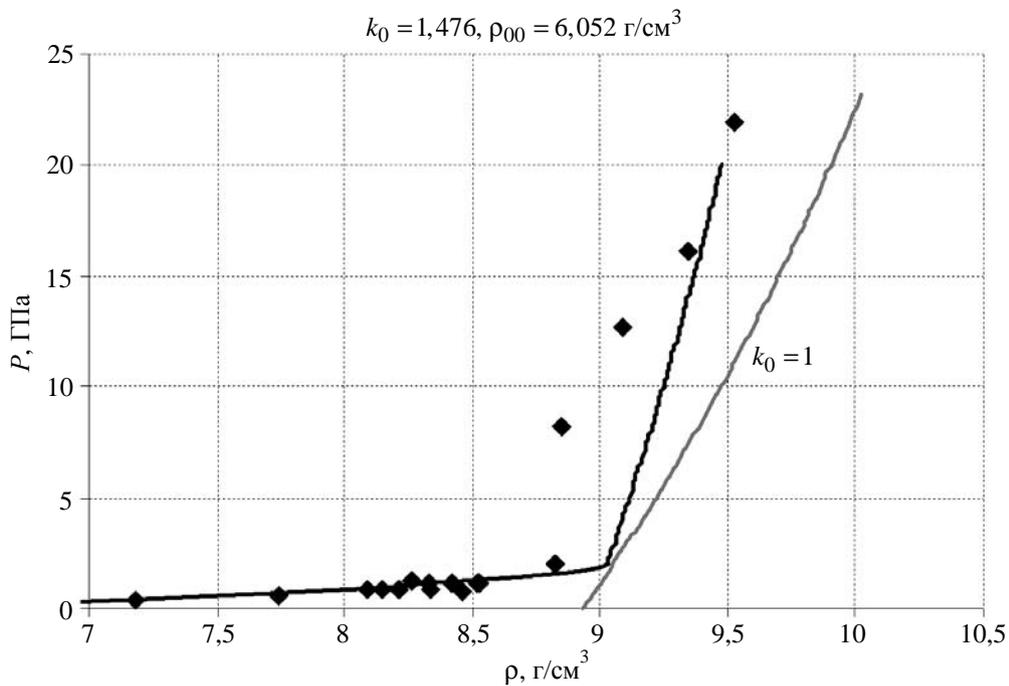


Рис. 2. Расчетная ударная адиабата пористой меди ( $k_0 = 1,476$ ), сплошной меди ( $k_0 = 1$ ) и экспериментальные данные

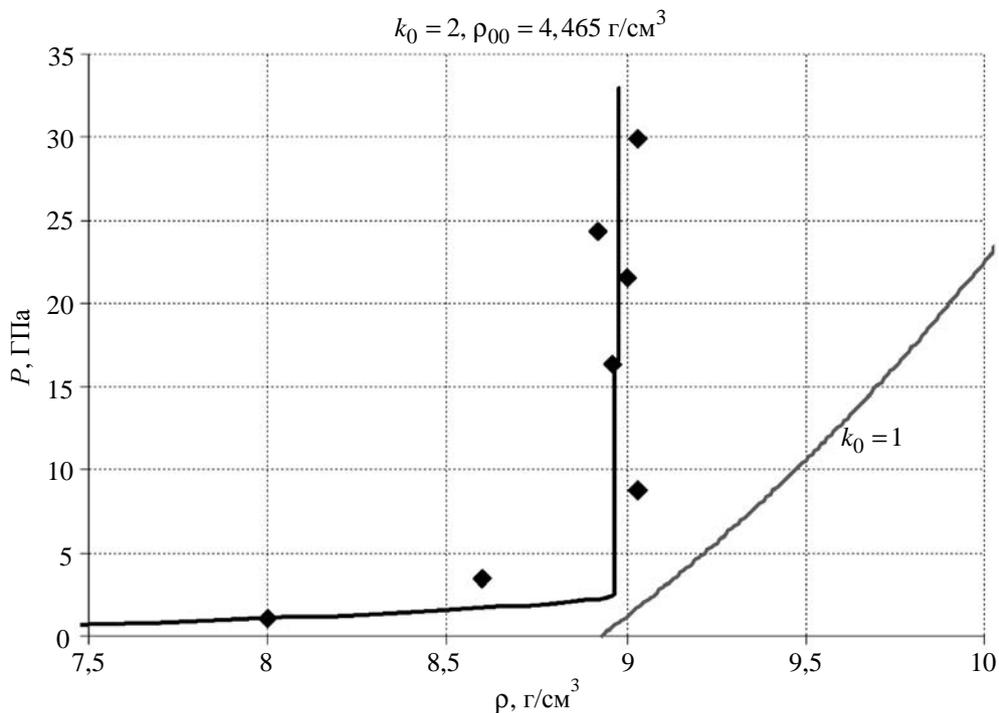


Рис. 3. Расчетная ударная адиабата пористой меди ( $k_0 = 2$ ), сплошной меди ( $k_0 = 1$ ) и экспериментальные данные

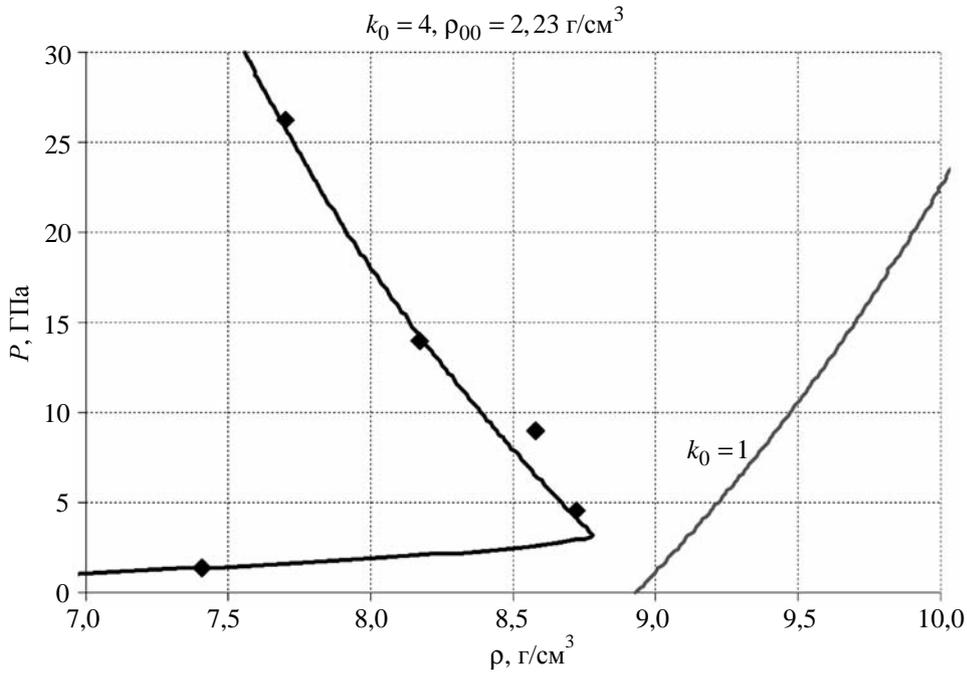


Рис. 4. Расчетная ударная адиабата пористой меди ( $k_0 = 4$ ), сплошной меди ( $k_0 = 1$ ) и экспериментальные данные

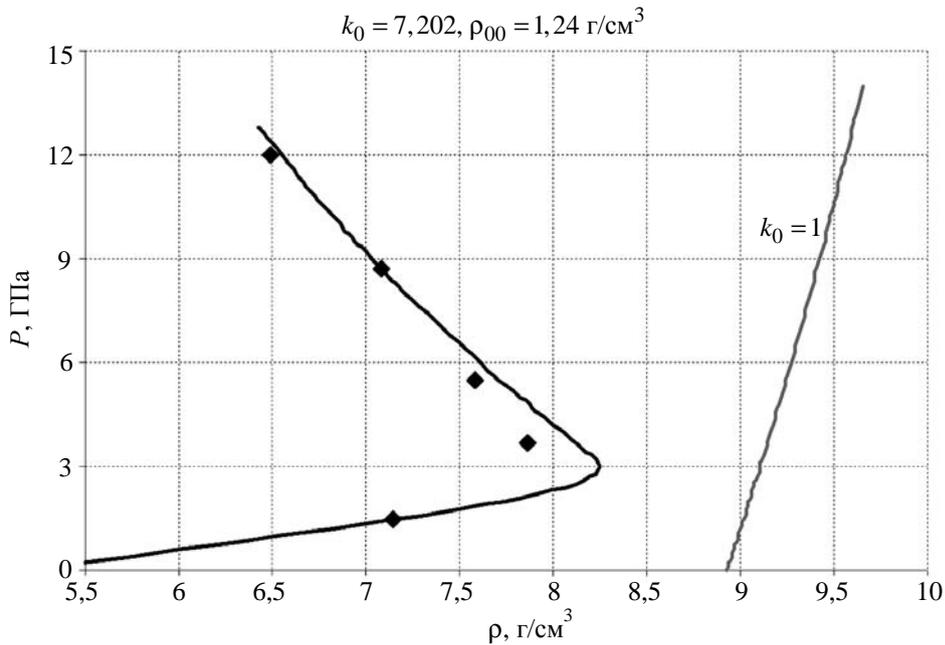


Рис. 5. Расчетная ударная адиабата пористой меди ( $k_0 = 7,202$ ), сплошной меди ( $k_0 = 1$ ) и экспериментальные данные

Из рис. 1–5 следует:

1) ударная адиабата пористого вещества состоит из двух ветвей: верхняя (при высоких давлениях) соответствует компактированному веществу, нижняя соответствует неполному закрытию пор. Переход от нижней ветви к верхней происхо-

дит в окрестности точки  $P_c$ , которая определяет давление компактирования пористого вещества;

2) с увеличением начальной пористости  $k_0$  точка, соответствующая  $P_c$ , дальше отходит от ударной адиабаты сплошного вещества ( $k_0 = 1$ ), и

значение  $P_c$  увеличивается. Так, наилучшего описания экспериментальных точек удалось добиться со следующими величинами  $P_c$ : при  $k_0 = 1,206$   $P_c = 1,9$  ГПа; при  $k_0 = 1,476$   $P_c = 2,0$  ГПа; при  $k_0 = 2$   $P_c = 2,5$  ГПа; при  $k_0 = 4$   $P_c = 3,3$  ГПа; при  $k_0 = 7,202$   $P_c = 3,2$  ГПа;

3) при  $k_0 > 2$  наклон верхнего участка ударной адиабаты меняется с положительного на отрицательный. Такое аномальное поведение ударной адиабаты связано с сильным разогревом пористых веществ в ударной волне, и доля тепловых энергии и давления может стать столь большой, что плотность сжатого вещества с возрастанием давления уменьшается, т. е. вещество, будучи сильно разогретым, расширяется. Для лучшего расчетного описания экспериментальных данных значение параметра Грюнайзена было уменьшено с  $\Gamma = 1,96$  до  $\Gamma = 1,33$ , что соответствует существующим представлениям об уменьшении  $\Gamma$  при росте температуры.

Рассмотренный способ определения  $P_c$  сопряжен с проведением трудоемких экспериментов с пористыми материалами в низкой области давлений нагружения. Кроме того, используя данные об ударной сжимаемости пористых веществ при исследовании компактирования разрушенных материалов, делается предположение, что разрушенный образец имеет равномерную пористую структуру. Однако, как показывают металлографические исследования откольного разрушения, такое предположение не совсем корректно. Поэтому данные, полученные из исследования ударной сжимаемости пористых материалов, могут быть использованы как оценочные значения параметра  $P_c$  в задачах компактирования.

## 2. Определение давления компактирования по результатам экспериментально-расчетного исследования откольного разрушения и последующего компактирования меди

Согласно другому способу давление компактирования  $P_c$  определяется как амплитуда ударной волны, в результате прохождения которой по разрушенному образцу происходит его компактирование. Этот способ наиболее приближен к реальному процессу компактирования поврежденной

среды и позволяет кроме определения параметров численной модели провести ее тестирование.

Метод экспериментально-расчетного исследования компактирования был отработан на образцах из алюминия [1]. Согласно этому методу предварительно разрушенные образцы (опыты на откольное разрушение) в дальнейшем компактируются во второй серии ударных экспериментов, поэтому работа разбивается на 2 этапа:

1) на первом этапе проводится серия экспериментов, где в образцах создается внутренняя поврежденность;

2) 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.

По такой же методике были проведены исследования компактирования меди.

### 2.1. Исследование откольного разрушения меди

*2.1.1. Постановка экспериментов первого этапа.* Схема постановки опытов приведена на рис. 6 (материалы ударника, экрана и кольца – медь, подложка – фторопласт; все размеры сборки приведены на рисунке). Разгон ударника осуществлялся в стволе легкогазовой пушки калибра 37 мм. Скорость полета ударника к мишени (экран+образец+подложка) определялась с помощью специального лазерного устройства, позволяющего проводить измерения скорости снаряда с относительной погрешностью ~1 % в диапазоне скоростей 100 ÷ 500 м/с.

Было проведено 3 эксперимента в одинаковой постановке, изменялась только скорость соударения ударника и мишени –  $W_{уд} = 159, 198, 225$  м/с.

Выбор постановки опытов (размеры сборки, материал подложки, скорости соударения) определялся созданием в срединном сечении образца условий для возникновения растягивающих напряжений и необходимостью сохранения образцов для их дальнейшего металлографического анализа. Предварительно постановка экспериментов отрабатывалась численно по многомерной программе [9]. На рис. 7 для одной из рассматриваемых задач приведены результаты двумерного численного моделирования.

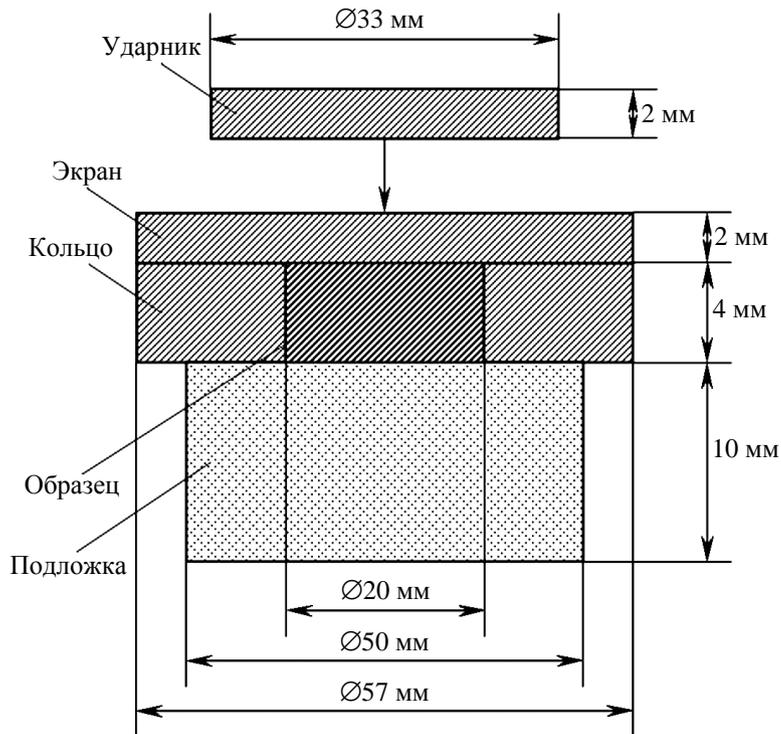


Рис. 6. Схема эксперимента

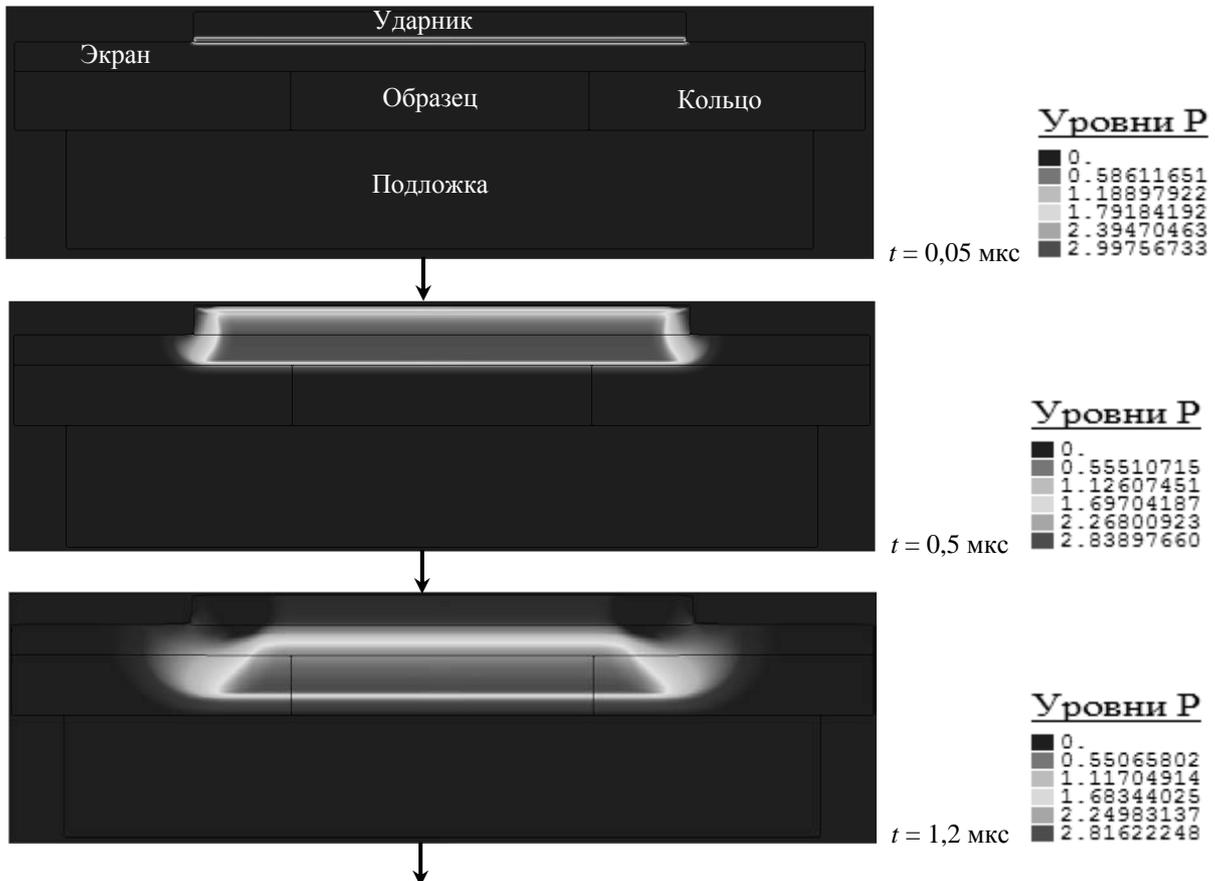


Рис. 7. Результаты двумерного расчета: распространение ударной волны, волн разрежения и образование области растягивающих напряжений в сборке;  $P$ , ГПа (см. также с. 27)

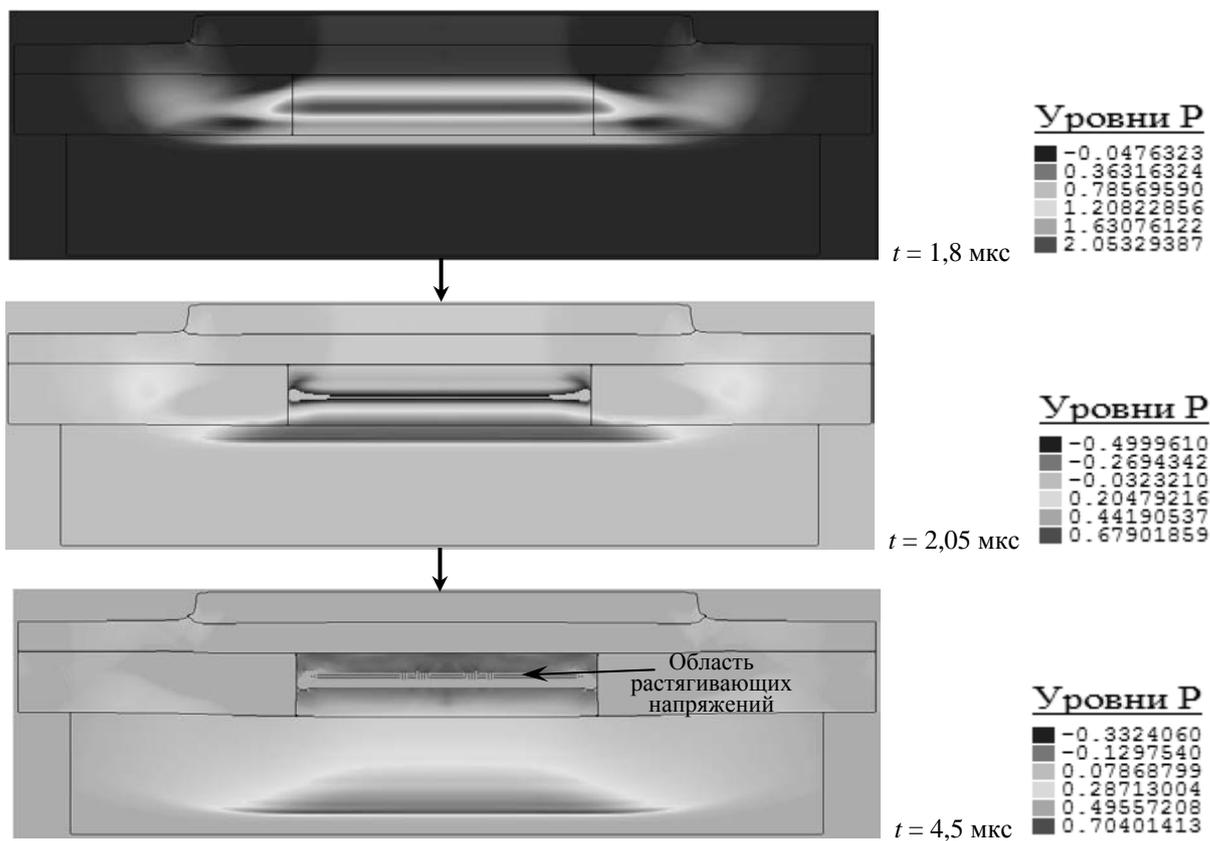


Рис. 7. Окончание

2.1.2. *Результаты экспериментов.* После каждого ударно-волнового эксперимента с зарегистрированной скоростью нагружения (соударения) сохраненный образец разрезался по диаметру, и исследовался шлиф его поперечного среза. В этих исследованиях определялись степень и характер

поврежденности. На рис. 8 приведены результаты металлографического анализа сохраненных в трех опытах медных образцов. В середине образцов образовалась зона, в которой видны следы повреждений – нарушения сплошной структуры материала образца.

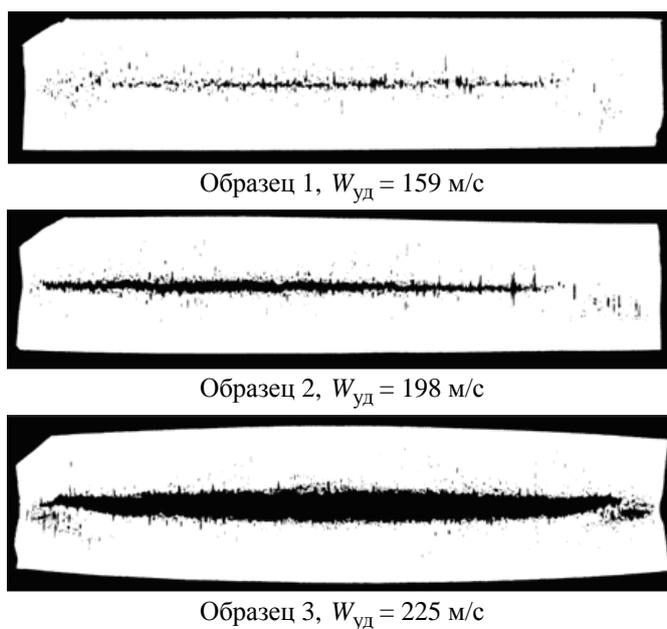


Рис. 8. Картина шлифов медных образцов при увеличении 50х

Как следует из рис. 8, с увеличением скорости нагружения возрастает поврежденность образцов: при  $W_{уд} = 159$  м/с повреждения незначительные – видны отдельные дефекты, выстроенные примерно в одну линию, при  $W_{уд} = 198$  м/с линия расширяется, а при  $W_{уд} = 225$  м/с в середине образца образуется магистральная трещина.

Характер разрушения образцов – вязкий, с характерным дефектом, имеющим форму поры, вытянутой вдоль направления движения ударной волны и волны разгрузки (см. рис. 9, где показан фрагмент структуры образца 1 после опыта).

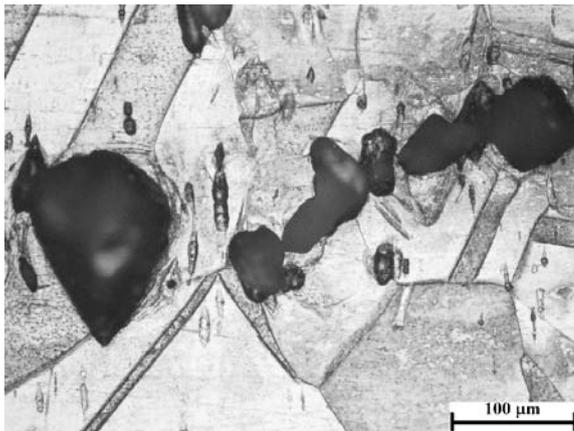


Рис. 9. Фрагмент структуры образца 1 после опыта при увеличении 200х

Объяснить такой характер разрушения нам пока не удастся. Есть лишь предположение, что вытянутость дефектов связана с предварительной обработкой заготовки, из которой вырезались образцы. Предварительная обработка заключалась в отжиге меди в течение 100 мин при температуре 500 °С. Известно, что при отжиге медь становится более пластичной и податливой и, возможно, при ударном нагружении более текучей в направлении распространения ударной волны.

Параллельно с экспериментом выполнялось численное сопровождение проведенных опытов. При моделировании задач соударения с учетом сдвиговой и откольной прочности материалов использовались уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена (уравнения (2), (3)), дислокационная релаксационная модель сдвиговой прочности [10] и кинетическая модель вязкого откольного разрушения [11]. Параметры модели разрушения приведены в [12].

*2.1.3. Результаты численного моделирования откольного разрушения меди.* Ниже для трех опытов со скоростями нагружения  $W_{уд} = 159, 198, 225$  м/с представлены расчетная динамика роста поврежденности  $\omega(x)$  по толщине образца и сравнение результатов расчетов с результатами металлографического анализа сохраненных после опытов образцов (см. рис. 10–12).

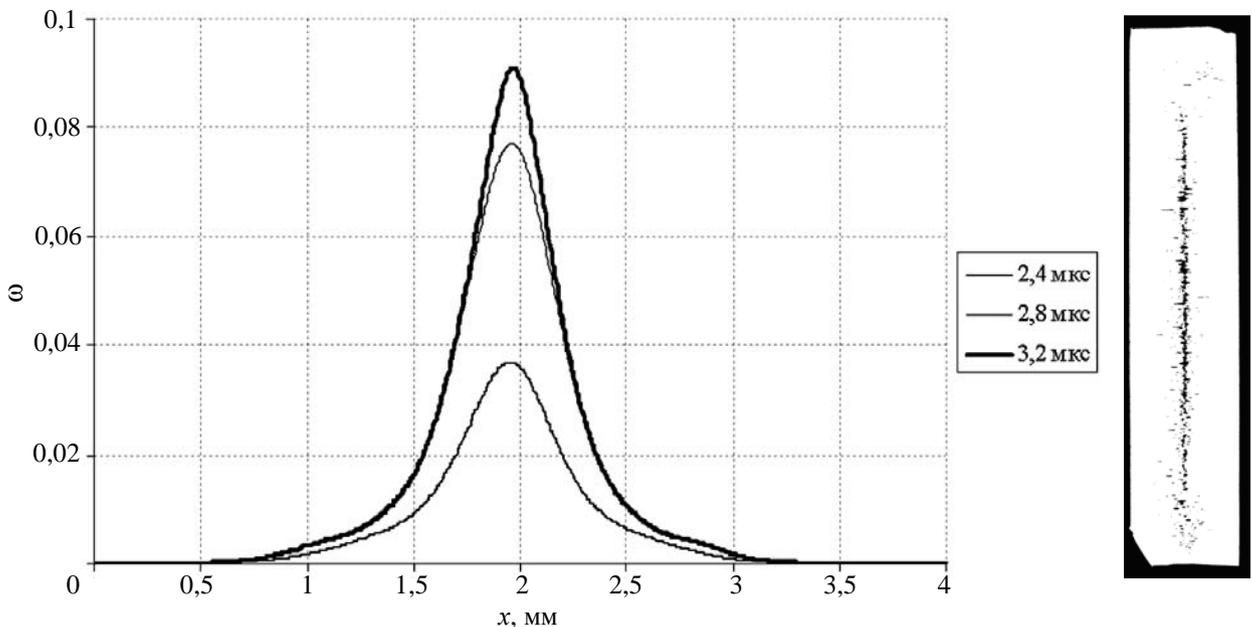


Рис. 10. Расчетное распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ( $W_{уд} = 159$  м/с)

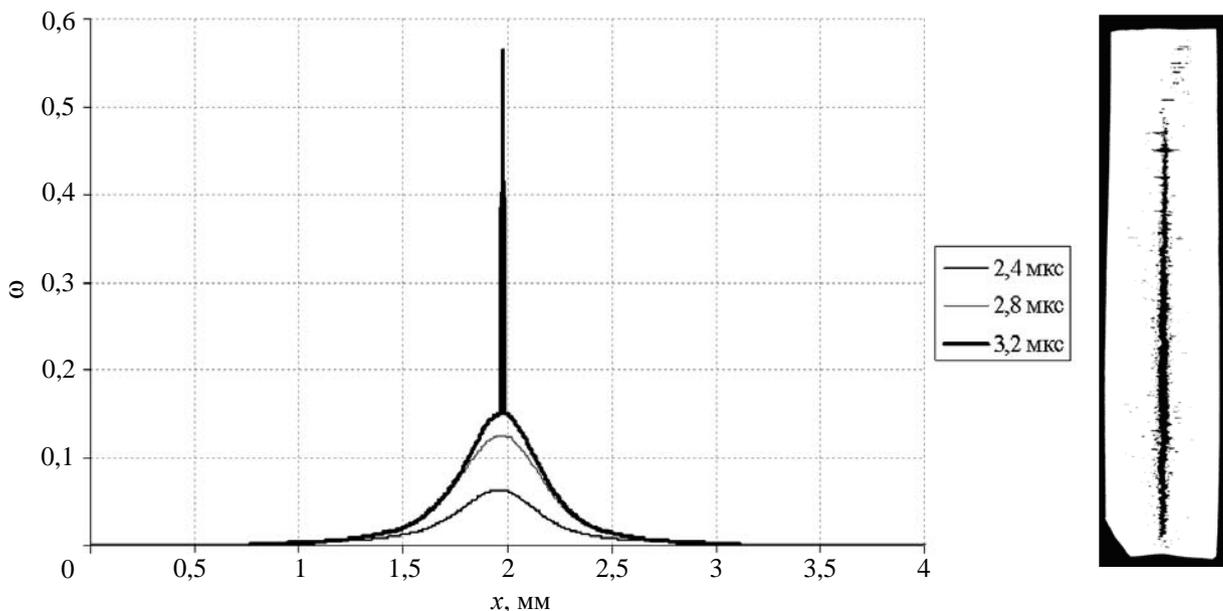


Рис. 11. Расчетное распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ( $W_{уд} = 198$  м/с)

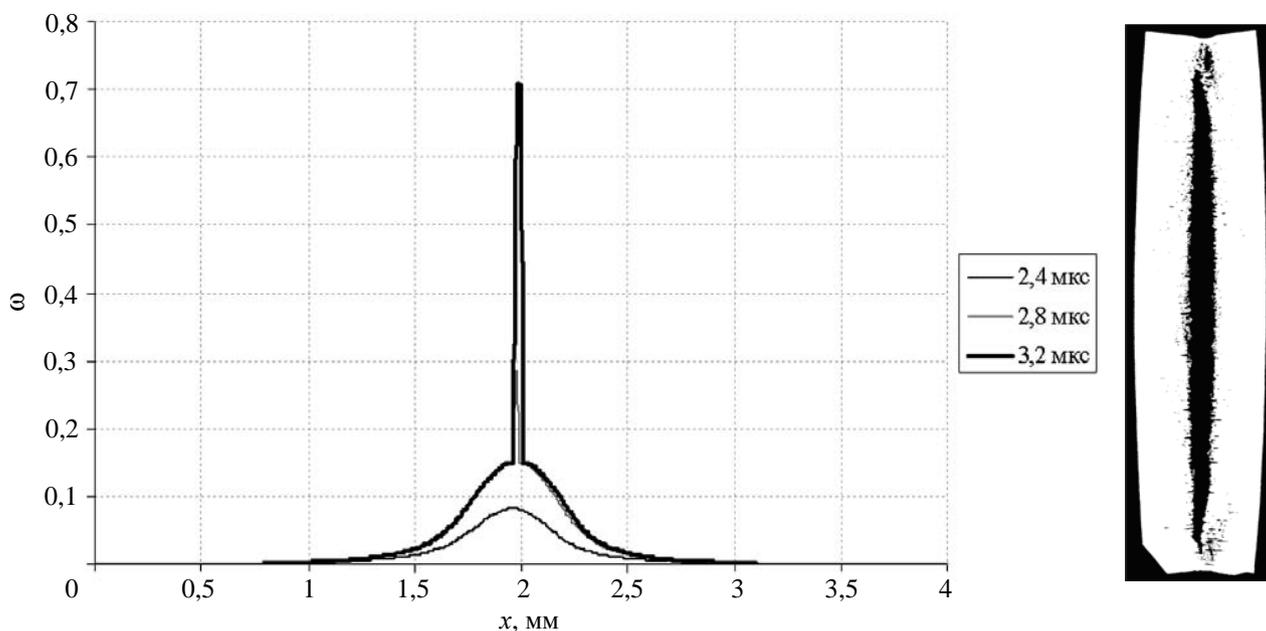


Рис. 12. Расчетное распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ( $W_{уд} = 255$  м/с)

Как видно из приведенных рисунков, с увеличением скорости соударения или соответствующей данной скорости амплитуде ударной волны (при  $W_{уд} = 159$  м/с  $\sigma_0 \approx 2,9$  ГПа; при  $W_{уд} = 198$  м/с  $\sigma_0 \approx 3,6$  ГПа; при  $W_{уд} = 225$  м/с  $\sigma_0 \approx 4,1$  ГПа) поврежденность увеличивается от  $\omega_{max} \approx 0,09$  при  $W_{уд} = 159$  м/с до  $\omega_{max} \approx 0,15$  при  $W_{уд} = 225$  м/с, превышая критическое значение поврежденности,

соответствующее разделению образца на части. Зона разрушения, как видно из рис. 10–12, находится в срединной области образцов, и толщины откольных слоев во всех опытах –  $\delta_{отк}$  как в расчетах, так и при измерениях, сделанных по фотографиям поперечных срезов, составляют  $\sim 2$  мм.

По результатам проведенного расчетно-экспериментального анализа данных по откольному разрушению меди для дальнейшего исследования на втором этапе (компактирование разрушенных

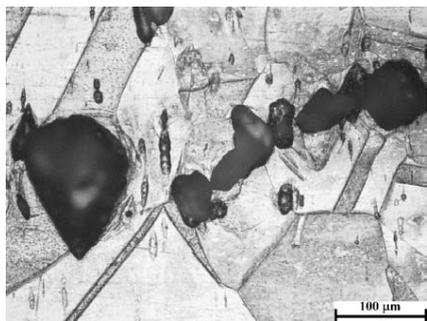
образцов при повторном нагружении) был выбран вариант постановки опыта, в котором скорость соударения медного ударника с мишенью составила  $\approx 160$  м/с. Всего было подготовлено 5 образцов, имеющих внутреннюю поврежденность как у образца 1 (см. рис. 8).

## 2.2. Исследование компактирования разрушенной меди

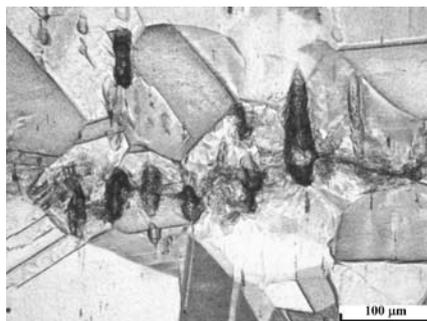
**2.2.1. Постановка экспериментов второго этапа и результаты опытов.** На втором этапе работы было проведено пять опытов, в которых образцы с заданной внутренней поврежденностью нагружались медным ударником со скоростями

111, 154, 211, 242, 410 м/с, как и в постановке опытов первого этапа (см. рис. 6). Отличие от схемы эксперимента первого этапа заключалось в замене фторопластовой подложки, расположенной за образцом, на медную, что позволило исключить образование волны разрежения на границе раздела образец-подложка и, следовательно, повторного образования откольного разрушения. Таким образом, предварительно разрушенный образец будет компактироваться (будут «залечиваться» внутренние повреждения) проходящей ударной волной.

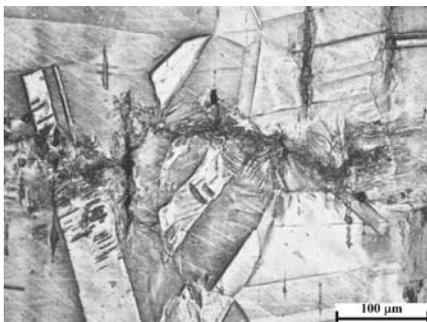
На рис. 13 приведены результаты металлографического анализа постопытных образцов после компактирования и образца-свидетеля с внутренней поврежденностью.



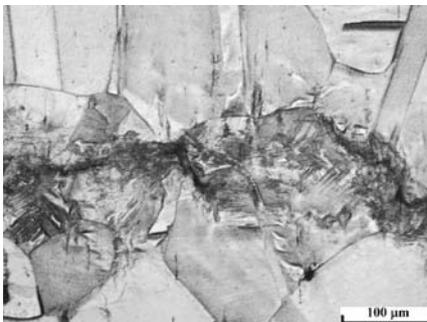
Фрагмент образца после опыта на откольное разрушение ( $W_{уд} = 159$  м/с)



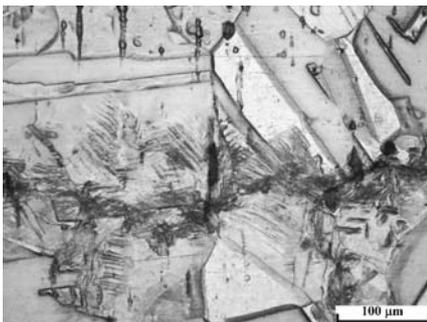
Фрагмент образца после опыта на компактирование ( $W_{уд} = 111$  м/с)



Фрагмент образца после опыта на компактирование ( $W_{уд} = 154$  м/с)



Фрагмент образца после опыта на компактирование ( $W_{уд} = 211$  м/с)



Фрагмент образца после опыта на компактирование ( $W_{уд} = 242$  м/с)



Фрагмент образца после опыта на компактирование ( $W_{уд} = 410$  м/с)

Рис. 13. Результаты металлографического анализа медных образцов после опытов на компактирование и образца-свидетеля при увеличении 200x

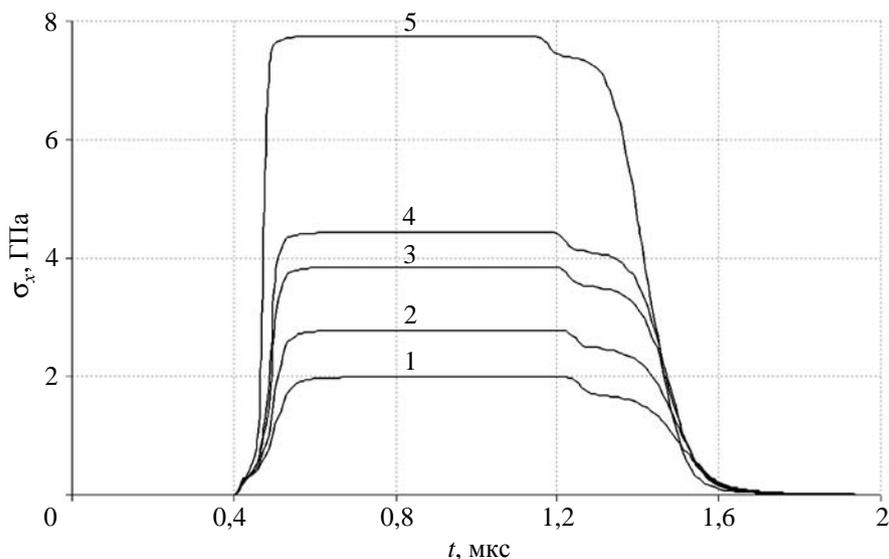


Рис. 14. Расчетные зависимости  $\sigma(t)$  – входящие в образец импульсы:  
1 – 111 м/с, 2 – 154 м/с, 3 – 211 м/с, 4 – 242 м/с, 5 – 410 м/с

На рис. 14 для каждого опыта на компактирование меди приведены расчетные профили ударных волн, по которым определялись соответствующие скоростям нагружения значения амплитуд ударных волн ( $\sigma_0$ ).

Согласно полученным результатам при повторном нагружении медных образцов, имеющих внутреннюю поврежденность в виде цепочки дефектов, вытянутых вдоль направления движения ударной волны, структура материала в области поврежденности изменилась – дефекты сомкнулись, и в зоне бывшей поврежденности видна узкая полоса, которая образуется в результате смыкания стенок пор. По обе стороны трещины-полосы наблюдаются следы интенсивной деформации в виде областей повышенной травимости, а также участков зерен, покрытых рядами параллельных полос, имеющих, вероятно, двойниковую природу [13]. Полоса, затронутая следами интенсивной деформации, по ширине  $\sim 200$  мкм соответствует ширине созданной в образцах зоны поврежденности. Такие изменения в структуре меди характерны для всех опытов на компактирование, в которых амплитуда ударной волны изменяется от  $\sim 2$  до  $\sim 8$  ГПа. Причем в опыте со скоростью нагружения  $W = 110$  м/с ( $\sigma_0 \approx 2$  ГПа) видны как следы компактирования, так и не сомкнувшиеся поры. По мнению авторов в данном опыте зарегистрировано начало процесса компактирования, а созданное в образце напряжение нагружения соответствует давлению компактирования  $P_c$ , полу-

ченному по результатам исследования ударной сжимаемости пористой меди.

Отметим также, что в достигнутом интервале напряжений не удалось получить полностью бездефектную структуру. Возможно, это связано с тем, что начальная поврежденность образца была слишком большая ( $\omega_{\max} \approx 0,09$  – соответствует началу образования магистральной трещины, рис. 10), и процесс компактирования в данном случае проходил по механизму схлопывания свободных поверхностей, а тогда полностью скомпактированный образец все равно оставляет «след» аналогично случаю «склеенной чашки».

Все же отметим, что в проведенных экспериментах процесс залечивания дефектной структуры имеет место, а диапазон реализованных при этом давлений соответствует давлению компактирования, полученным при исследовании сжатия пористой меди.

## Заключение

Для численного решения задач откольного разрушения и компактирования необходимо кроме построения физически обоснованных моделей знание параметров, входящих в эти модели. Причем наиболее достоверными являются параметры, определенные непосредственно из экспериментов, которые не используют для тестирования моделей.

К сожалению, в последнее время во многих случаях процедура нахождения параметров модели

сводится к верификации численных расчетов и экспериментальных зависимостей, пренебрегая при этом как физическим содержанием самой модели, так и полученными при этом значениями параметров модели.

В настоящей работе рассмотрены два способа определения оценочного значения параметра модели компактирования – давления компактирования. Давление компактирования – это граничное значение давления, при котором порошкообразный материал становится сплошным, а в поврежденном образце «залечиваются» внутренние дефекты.

Первый способ основан на экспериментально-расчетном исследовании ударной сжимаемости пористых образцов из меди. Здесь для разных начальных пористостей получены значения  $P_c$ : при  $k_0 = 1,206$   $P_c = 1,9$  ГПа; при  $k_0 = 1,476$   $P_c = 2,0$  ГПа; при  $k_0 = 2$   $P_c = 2,5$  ГПа; при  $k_0 = 4$   $P_c = 3,3$  ГПа; при  $k_0 = 7,202$   $P_c = 3,2$  ГПа.

Отметим также, что процедура построения ударных адиабат пористых веществ легла в основу модели компактирования поврежденной среды.

Второй способ предполагает проведение серии экспериментов, в которых предварительно разрушенные образцы (опыты на откольное разрушение) компактируются во второй серии ударных экспериментов. При этом способе давление компактирования определяется как амплитуда ударной волны, при которой происходит «залечивание» поврежденного материала. Для меди в работе получено, что при воздействии на поврежденный образец ударной волной амплитудой  $\sim 2$  ГПа начинается процесс компактирования – «залечивания» поврежденности, но при больших (до  $\sim 8$  ГПа) значениях амплитуд ударных волн полностью бездефектную структуру медных образцов получить не удалось.

### Список литературы

1. Симаков В. Г., Терешкина И. А., Трунин И. Р. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование откольного разрушения и компактирования алюминия // Сборник докладов Международной конференции XV Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 432–438.

2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

3. Herrmann W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40, N 6. P. 2490.

4. Carrol M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 1626–1635.

5. Подурец М. А. Термодинамическая модель пористого тела // Математическое моделирование. 1996. Вып. 8, № 2. С. 29.

6. Boade R. R. Compression of porous copper by shock waves // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, N 12. P. 5693–5702.

7. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Сутулов Ю. Н. и др. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. Вып. 3(9). С. 1024–1038.

8. Грязнов В. К., Жерноклетов М. В., Трунин Р. Ф. и др. Ударно-волновое сжатие сильно-неидеальной плазмы металлов и ее термодинамика // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. Вып. 4(10). С. 1242–1265.

9. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридонов В. Ф. и др. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41–50.

10. Гилман Д. Д. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии: Пер. с англ. Механика. 1970. Т. 120, № 2. С. 96–124.

11. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, N 11. P. 4814–4826.

12. Трунин И. Р., Терешкина И. А. Некоторые вопросы теории, эксперимента и численного моделирования откольного разрушения металлов: Препринт № 113. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.

13. Подурец А. М., Раевский В. А., Ханжин В. Г. и др. Двойниковые структуры в меди после ударного и безударного высокоскоростного нагружения // ФГВ. 2011. Т. 47, № 5. С. 123–131.