

2. Потоки «галактических» ионов, возникающие при соударении ступок пыли с защитными оболочками. С.М.Ушеренко, А.С.Калиниченко, А.И.Белоус и др. Второй белорусский космический конгресс 25-27 октября 2005 года, Минск. Материалы конгресса, Минск, ОИПИ НАН Беларуси, 2005.-С.33-38.
3. Ушеренко Ю.С. Модификация металлов и сплавов высокоскоростным потоком твердых частиц. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния». – Гомель 2013. 188 с.

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ОТКОЛЬНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

И.А. Терешкина^{1,2}, И.Р. Трунин^{1,2}, В.Г. Симаков^{1,2}, М.И. Ткаченко^{1,2}, Ю.В. Батьков²

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

Введение

Откольное разрушение твердых тел при динамических нагрузках представляет собой сложный физический процесс, который включает в себя разрушение структурных элементов различных масштабов, начиная от образования микроскопических дефектов на атомном уровне и заканчивая макротрещинами и магистральными трещинами.

Распространению одной или нескольких трещин предшествует подготовительная фаза (рассеянное разрушение), представляющая собой накопление дефектов – микропор или микротрещин, размер которых определяется структурой материала, а скорость накопления условиями нагружения. Этот период занимает определенную часть времени в процессе разрушения и существенно не отражается на макроскопической сплошности материала. При достижении на некотором участке критической концентрации зародышевых дефектов происходит их слияние, укрупнение, что приводит к появлению более крупного дефекта – макротрещины. Появление таких макротрещин в большом количестве может привести к следующему этапу укрупнения – образованию магистральной трещины.

Этот общепризнанный подход многостадийности разрушения, подтвержденный многочисленными экспериментами, лежит в основе формулировки феноменологических моделей разрушения, например [1], в которых используются макроскопические переменные, характеризующие структурные изменения на микроуровне. При описании состояния материала через такие переменные необходимо выбрать соответствующие меры количественной оценки поврежденности.

В качестве меры поврежденности в большинстве случаев выбирают скалярный параметр ω , изменяющийся от начального состояния ω_0 , соответствующего неповрежденному материалу, до предельной величины $\omega_{кр}$, соответствующей образованию в данном объеме материала макроскопической трещины определенных размеров.

По определению $\omega = V_T / V = 1 - \rho / \rho_s$, где $V = V_T + V_s$ ($V = 1/\rho$ – общий удельный объем материала, V_T – объем дефектов, $V_s = 1/\rho_s$ – удельный объем сплошного материала, ρ – плотность материала с дефектами, ρ_s – плотность сплошной матрицы). При $V = V_s$ – $\omega = 0$; при $V = V_T$ – $\omega = 1$; т.е. поврежденность изменяется в пределах $0 < \omega < 1$.

Задача данной работы состояла в следующем:

1. провести экспериментальные исследования откольного разрушения образцов из стали 10 и получить количественные значения откольной поврежденности этих образцов;
2. провести численное моделирование экспериментов.

Цель работы: используя методику определения плотности материалов и планиметрическую металлографическую методику измерения поврежденности, определить количественные характеристики поврежденности образцов из стали после ударно-волновых экспериментов.

Новизна данной работы заключается в получении данных о поврежденности образцов из стали 10: характер и степень разрушения, величина поврежденности и распределение поврежденности по толщине образцов, которые будут использоваться при определении параметров численной модели откольного разрушения стали.

1 Постановка и результаты экспериментов

Исследуемые образцы представляют собой цилиндры из стали 10 диаметром 20 мм и толщиной 4 мм.

Перед тем как проводить эксперименты, вычислялась плотность стальных образцов, которая в дальнейшем будет использоваться для определения поврежденности этих образцов. Методика определения плотности заключается в следующем: 1 – на электронных весах измеряются массы образца в воде и в воздухе; 2 – плотность образца вычисляется по формуле: $\rho_s = m_1 \rho_w / (m_1 - m_2)$, выведенной из закона Архимеда, где m_1 – масса образца, измеренная в воздухе, m_2 – масса образца, измеренная в воде, ρ_w – плотность воды.

Полученные значения плотностей (ρ_s) четырех образцов из стали далее приведены в таблице 1. Определенная указанным способом плотность вещества совпадает со справочным значением плотности стали.

Затем образцы с известными измеренными характеристиками нагружались ударниками с различными скоростями.

Схема постановки опытов приведена на рисунке 1 (материалы ударника и образца – сталь 10, подложка – фторопласт; все размеры сборки приведены на рисунке). Разгон ударника осуществлялся в стволе легкогазовой пушки калибра 37 мм. Было проведено четыре эксперимента в одинаковой постановке, изменялась только скорость соударения ударника и мишени – $W_{уд} = 247, 287, 348, 391$ м/с.

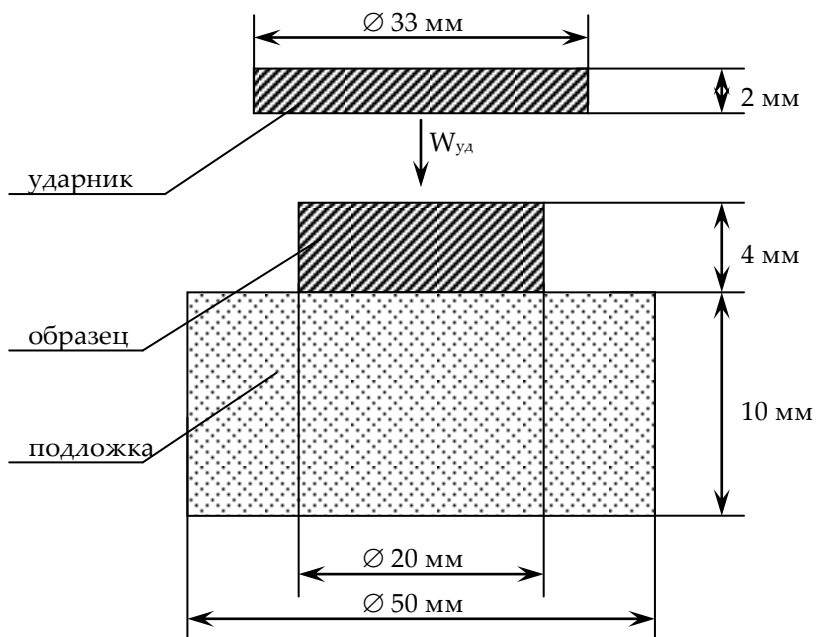


Рисунок 1. Схема эксперимента

При такой постановке опытов в срединном сечении образца создаются условия для возникновения растягивающих напряжений, что приводит к откольному разрушению образцов. В зависимости от скорости нагружения изменяется степень откольного разрушения образцов.

После каждого ударно-волнового эксперимента с зарегистрированной скоростью нагружения сохранённый образец: 1 – взвешивался в воздухе и в воде, и вычислялась плотность (ρ) для дальнейшего определения поврежденности образца; 2 – разрезался по диаметру, и по шлифу его поперечного среза определялись степень и характер поврежденности. Используя планиметрическую металлографическую методику, определялась величина поврежденности образца, и строилось распределение поврежденности по толщине образца.

После определения плотности образца до и после эксперимента вычислялась поврежденность $\omega_{\text{экс}}=1-\rho/\rho_s$. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты вычисления плотностей и поврежденности

| Образец | W_{yA} , м/с | ρ_s , г/см ³ | ρ , г/см ³ | $\omega_{\text{экс}}$ |
|---------|----------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 247 | 7,836 | 7,786 | 0,006 |
| 2 | 287 | 7,854 | 7,732 | 0,015 |
| 3 | 348 | 7,837 | 7,687 | 0,019 |
| 4 | 391 | 7,852 | 7,610 | 0,031 |

Как видно из таблицы 1, с ростом скорости соударения поврежденность возрастает от значения $\omega_{\text{экс}} \sim 0,006$ при $W_{yA} = 247$ м/с до $\omega_{\text{экс}} \sim 0,031$ при $W_{yA} = 391$ м/с.

Изображения диаметральных поперечных срезов сохранённых в четырех опытах стальных образцов приведены на рисунке 2. В срединных сечениях образцов образовалась зона, в которой видны следы повреждений – нарушения сплошной структуры материала образца.

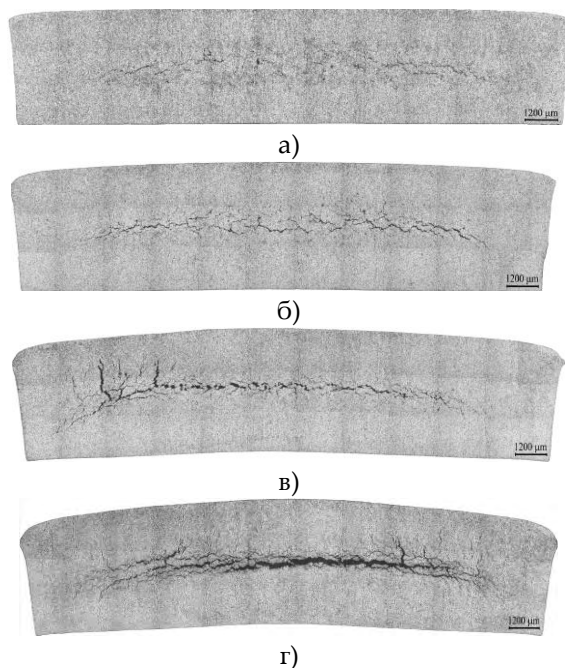


Рисунок 2. Картина шлифов стальных образцов при увеличении 50х: а) – образец №1 ($W_{yA} = 247$ м/с), б) – образец №2 ($W_{yA} = 287$ м/с), в) – образец №3 ($W_{yA} = 348$ м/с), г) – образец №4 ($W_{yA} = 391$ м/с)

Как следует из рисунка 2, с увеличением скорости нагружения возрастает поврежденность образцов: при $W_{yA} = 247$ м/с повреждения незначительные – видны отдельные микротрещины; при $W_{yA} = 287$ и 348 м/с размеры дефектов увеличиваются, и наиболее крупные – объединяются; при $W_{yA} = 391$ м/с в середине образца образуется магистральная трещина.

Согласно стереометрическому соотношению, измерение относительного объема дефектов (поврежденности) в образце с дефектами можно заменить измерением и суммированием

площадей на единице площади шлифа его поперечного среза. Поэтому для определения количественной величины поврежденности в постопытных образцах из стали использовался планиметрический метод, который основывается на измерении суммарной площади сечений дефектов на определенной площади металлографического шлифа.

Метод предполагает, используя пакет компьютерных программ Vestra [2], проводить обработку изображений микроструктуры и определять общее количество дефектов в кадре, среднюю площадь дефектов, площадь всех дефектов и плотность дефектов на данной площади – поврежденность ω .

В качестве примера применения планиметрического метода определения поврежденности рассмотрим этапы обработки изображения поперечного среза образца № 4 (рисунок 2):

1. На срезе с помощью графического редактора выделялись дефекты и контур образца. На рисунке 3 светло-серый прямоугольник – контур образца, поврежденность – трещины темно-серого цвета, срез образца – черный.

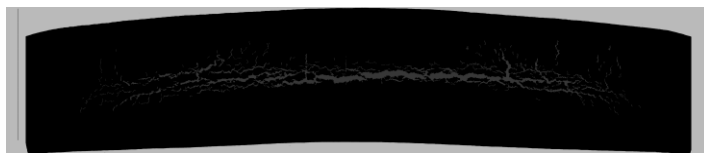


Рисунок 3. Этап №1 обработки изображения

2. Сечение разбивалось на N одинаковых зон, каждая зона соответствовала объемной части образца, которая имела массу равную 1 г. Т.е. объем каждой такой части образца $V=1/\rho_s$ и $\sum_{i=1}^N V_i = V_s$, где ρ_s , V_s – начальные плотность и объем образца. Поперечный размер зоны равнялся диаметру образца, ширина каждой зоны по толщине образца определялась из следующего соотношения: $\Delta x = \frac{1}{\pi \rho_s R^2}$, где R – радиус цилиндрического образца. Таким образом, на изображение накладывается прямоугольная сетка, внешняя граница которой соответствует начальным размерам образца – диаметр и толщина, а шаг сетки Δx по толщине образца определяется из приведенного выше соотношения. Для данного случая всего получается 10 зон. На рисунке 4 для примера приведены зоны 4, 6 и 8.



Рисунок 4. Этап №2 обработки изображения

3. В каждой зоне определяются общая площадь зоны и площадь зоны без дефектов, и вычитанием получается площадь, занимаемая дефектами (окрашена в темно-серый цвет) – S_T . Тогда поврежденность в каждой зоне образца, площадь которой S_i , равна $\omega_i = S_T/S_i$, а общая

поврежденность всего образца $\omega = \frac{\sum_{i=1}^N S_T}{S}$. Значения поврежденности, полученные по результатам

обработки поперечных сечений образцов №1-№ 4 (рисунок 2), приведены в таблице 2. Здесь же для сравнения представлены значения поврежденности $\omega_{\text{экс}}$, полученные методом взвешивания.

Таблица 2. Результаты экспериментов

| Образец | $W_{уд}$, м/с | ω | $\omega_{экс}$ |
|---------|----------------|----------|----------------|
| 1 | 247 | 0,008 | 0,006 |
| 2 | 287 | 0,013 | 0,015 |
| 3 | 348 | 0,020 | 0,019 |
| 4 | 391 | 0,036 | 0,031 |

Рассмотрены два способа определения значения откольной поврежденности ω : 1 – взвешивание образцов до и после опыта; 2 – измерение суммарной площади сечений дефектов на площади металлографического шлифа поперечного среза постопытного образца.

На примере образцов из стали 10 размером $\varnothing = 20$ мм, $h = 4$ мм, имеющих различную степень откольного разрушения, получено хорошее соответствие значений поврежденности, определенных разными способами.

Планиметрический метод также позволяет построить распределение поврежденности по всей толщине образца, что может быть использовано при определении параметров и тестировании численных моделей откольного разрушения.

2 Численное моделирование откольного разрушения

Моделирование экспериментов на откольное разрушение стальных образцов проводилось по одномерной программе [3].

Процедура численного моделирования заключается в решении системы дифференциальных уравнений, выведенных из законов сохранения импульса, массы и энергии, которая замыкается уравнением состояния в форме Ми-Грюнайзена, а для описания девиаторной составляющей тензора напряжений используется уравнение Малверна-Дуввала [4] с дислокационным релаксационным уравнением для скорости пластических сдвигов [5]. Моделирование откольного разрушения стали проводилось по кинетической модели хрупкого разрушения [1].

Такой набор уравнений и моделей традиционно используется авторами для решения одномерных задач ударно-волнового сжатия, упругопластического деформирования и откольного разрушения металлов.

В данной работе информацию, получаемую из расчетов, ограничим представлением о развитии поврежденности во внутренних сечениях стальных образцов.

На рисунке 5 показаны расчётные распределения поврежденности $\omega(x)$ по толщине образца на различные моменты времени взаимодействия встречных волн разгрузки и сравнение результатов численного моделирования с результатами металлографического анализа сохранных после опытов образцов.

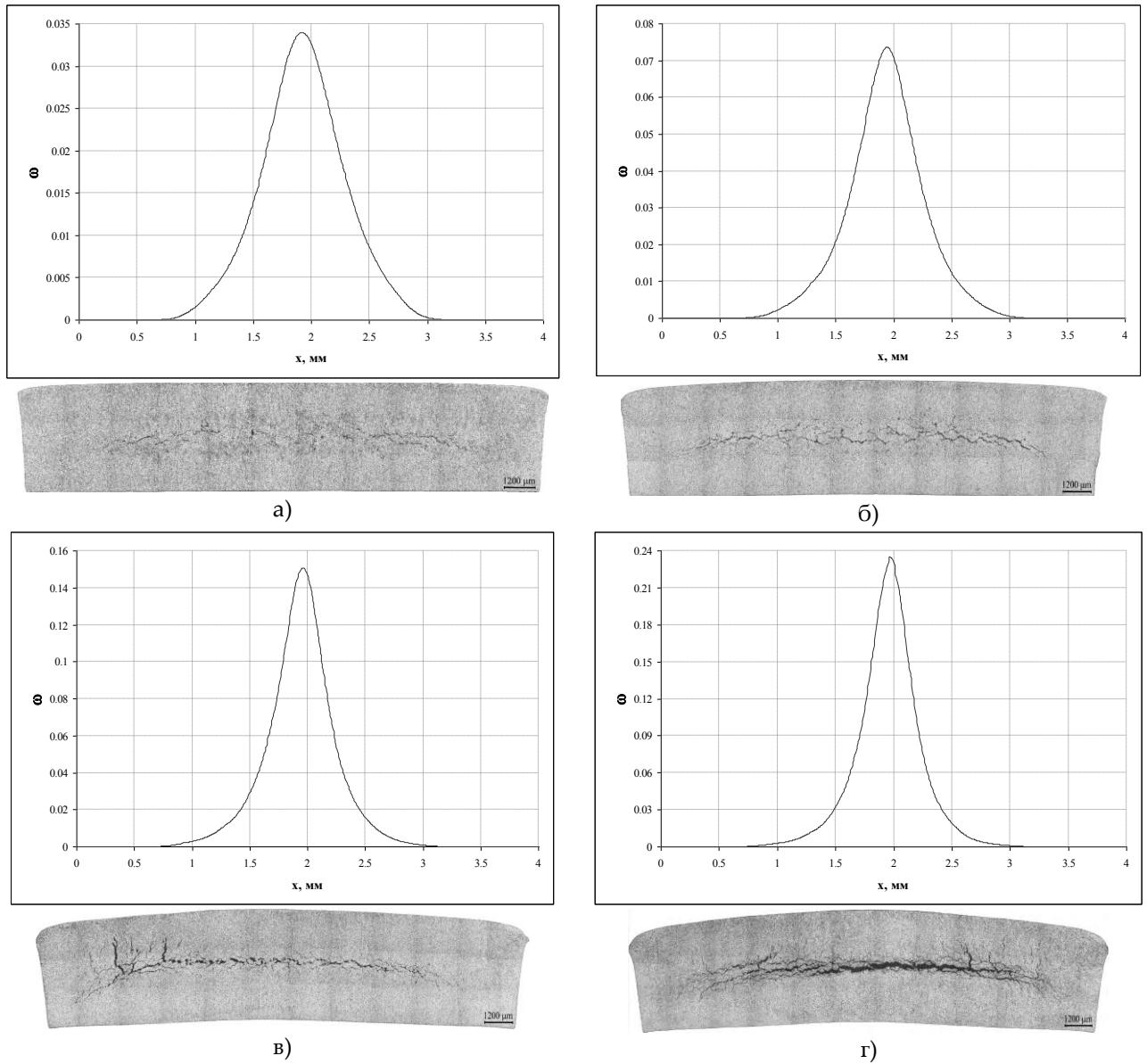


Рисунок 5. Распределение поврежденности по толщине образца и результаты металлографического анализа: а) – образец №1 ($W_{yд} = 247$ м/с), б) – образец №2 ($W_{yд} = 287$ м/с), в) – образец №3 ($W_{yд} = 348$ м/с), г) – образец №4 ($W_{yд} = 391$ м/с)

Как видно из рисунка 5, с ростом скорости соударения поврежденность возрастает от значения $\omega_{\text{max}} \sim 0,034$ при $W_{yд} = 247$ м/с до $\omega_{\text{max}} \sim 0,23$ при $W_{yд} = 391$ м/с, что качественно соответствует данным по визуальному наблюдению поперечных срезов образцов.

Количественные значения максимальной поврежденности сравниваются на рисунке 6 с гистограммами распределения поврежденности, полученными планиметрическим методом.

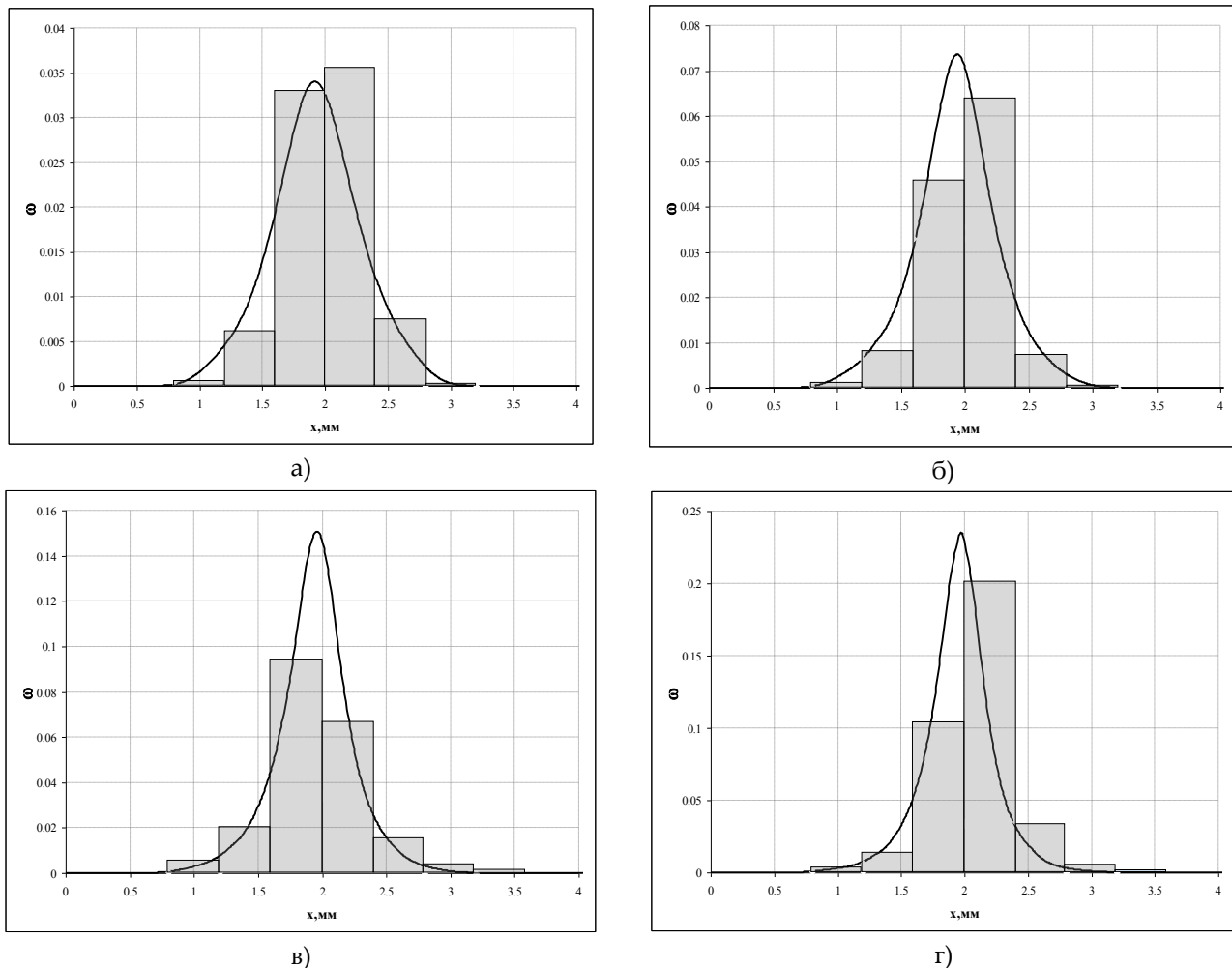


Рисунок 6. Сравнение результатов расчета и металлографического анализа: а) – образец №1 ($W_{уд} = 247$ м/с), б) – образец №2 ($W_{уд} = 287$ м/с), в) – образец №3 ($W_{уд} = 348$ м/с), г) – образец №4 ($W_{уд} = 391$ м/с)

Как следует из рисунка 6, получено удовлетворительное согласие результатов расчетов и результатов обработки экспериментальных данных металлографическим методом. Хорошо воспроизводится зона разрушения образцов – ширина зоны и сечение с максимальной величиной поврежденности, есть лишь отклонения от максимальных значений поврежденности для опытов с большой скоростью нагружения, когда поврежденность образца соответствует образованию магистральной трещины.

Заключение

Рассмотрены способы определения величины откольной поврежденности металлических образцов. Первый способ основывается на измерениях плотности образца до и после эксперимента и вычислении поврежденности. Второй способ предполагает проведение металлографического структурного анализа поперечного среза сохраненного в опыте образца и использование планиметрической методики определения площади среза дефекта.

Оба способа отработаны на экспериментах с образцами из стали 10, ударно-нагруженными ударниками с различными скоростями нагружения. Получено хорошее согласие результатов по обоим методикам.

Проведены модельные расчеты экспериментов, и построены распределения поврежденности по толщине мишеней, которые качественно и количественно совпадают с результатами, полученными по планиметрической металлографической методике.

Количественная дополнительная информация об откольном разрушении, способы определения которой рассмотрены в данной работе, позволит более корректно определять параметры модели откольного разрушения материалов.

Список литературы

1. L. Seaman, D. Curran, A. Shockey. Computational models for ductile and brittle fracture// J. Appl. Phys, 1976, Vol. 47, №11, p. 4814-4826.
2. Комплекс видеоизмерительный для анализа микроструктур и макроструктур материалов «VESTRA Imaging System»// <http://latemi.ru/catalog/vestra-imaging-system>, рубрики: Автоматизированные системы анализа изображений.
3. Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов. 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.
4. L.E. Malvern. Plastic wave propagation in bar of material exhibiting a strain rate effect// Quart. Appl. Math, 1951, Vol. 8, №4, p. 50-54.
5. Д.Д. Гилман. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии// Пер. с англ. Механика, 1970, Т. 120, №2, с. 96-124.

ЭФФЕКТ САМОЗАЛЕЧИВАНИЯ ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

С.Н. Буравова, Е.В. Петров

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Россия

В 1944 г Zener С. и Hollomon J.H., объяснили причину возникновения полос адиабатического сдвига потерей устойчивости пластической деформации при высокоскоростном нагружении, которая возникает в результате перехода работы деформации в тепло, что приводит к термическому разупрочнению, образованию узких полос локализованной деформации, росту температуры в полосах. Несмотря на многочисленные исследования, термомеханическая модель не смогла предложить какие-либо физические представления о зарождении и развитии процесса локализации, не способна прогнозировать места возникновения полос деформации, не отвечает на вопрос - почему локализация протекает в узкой полосе, а соседний материал остается недеформированным. Такая ситуация объясняется тем, что структурные исследования проводятся на сохраненных образцах и описывают изменения, которые произошли с материалом в результате взрывного воздействия, но *причину* изменения структурный анализ установить *принципиально* не может, в том числе и наличие высокой температуры в полосах локализованной деформации. Для этого надо знать особенности процесса деформирования, которые формируют микроструктуру в полосах локализации. Огромное количество публикаций, где полосы локализованной деформации объясняются наличием высокой температуры, не являются доказательством термомеханической модели локализации деформации. Несмотря на многочисленные исследования, термомеханическая модель не смогла предложить какие-либо физические представления о зарождении и развитии процесса локализации, не способна прогнозировать места возникновения полос деформации, не отвечает на вопрос - почему локализация протекает в узкой полосе, а соседний материал остается недеформированным. Такая ситуация объясняется тем, что структурные исследования проводятся на сохраненных образцах и описывают изменения, которые произошли с материалом в результате взрывного воздействия, но *причину* изменения структурный