

ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И КОМПАКТИРОВАНИЕ ЛАТУНИ Л63. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

М. А. Гусева¹, Г. Г. Иванова¹, И. А. Терешкина^{1,2}, И. Р. Трунин^{1,2}

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, 607186, г. Саров Нижегородской обл.

На примере латуни рассмотрен экспериментально-расчетный метод исследования откольного разрушения и компактирования, который позволяет дать количественные оценки параметров моделей откольного разрушения и компактирования металлов.

Ключевые слова: откольное разрушение, поврежденность, компактирование, модель откольного разрушения, модель компактирования.

Введение

Разрушение твердых тел при квазистатических и 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, микротрещин, адиабатических полос сдвига, 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 и, в частности, результатами микроструктурного анализа образцов из

латуни [1], лежит в основе формулировки феноменологических моделей разрушения (см., например, [2–4]), 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

$$\omega = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

(ρ – плотность материала с дефектами, ρ_s – плотность сплошного материала), изменяющийся от начального состояния $\omega = 0$, соответствующего неповрежденному материалу, до предельной величины $\omega_{кр}$, соответствующей образованию в данном объеме материала макроскопической трещины определенных размеров.

Скорость накопления повреждений в материале, учитывая многостадийность процесса разрушения, описывается эволюционным уравнением, выбор которого должен определяться его физическим содержанием, чтобы обеспечить приемлемую точность и адекватность результатов, полученных в экспериментах.

В настоящей работе скорость накопления повреждений $\dot{\omega}$ определялась по модели NAG [4, 5], которая успешно применяется авторами статьи при моделировании разрушения на встречных

волнах разгрузки (откольное разрушение) различных материалов [6–8].

Отметим, что модель откольного разрушения NAG описывает только две стадии разрушения (зарождение и рост дефектов). Однако во время роста дефекты укрупняются и могут сливаться, образуя макротрещины, которые перерастают в магистральную трещину.

Поэтому в варианте модели [9], который включен в расчетные программы ВНИИЭФ, вводится дополнительный параметр $\omega_{кр}$, который характеризует переход от незначительного разрушения к образованию магистральной трещины, т. е. слияние дефектов происходит, когда величина поврежденности ω достигает критического значения $\omega_{кр}$. Для определения $\omega_{кр}$ требуется проведение расчетного анализа экспериментов с различным уровнем нагружения и различной степенью разрушения. Одной из задач проведенных экспериментально-расчетных исследований была оценка значения $\omega_{кр}$ для латуни.

В отличие от большого количества разработанных и используемых в расчетах моделей откольного разрушения модели компактирования находятся на стадии их отработки, что связано, в первую очередь, с недостатком опытной информации о процессе «залечивания» поврежденного материала. Некоторые экспериментальные результаты по компактированию металлических образцов приведены в работах [10–12].

Модель компактирования поврежденной среды, которая использовалась при моделировании экспериментов с латунью, базируется на известной модели компактирования [13, 14]. В основе этой модели лежит простое представление функции пористости от давления $k(P) = 1 + (k_0 - 1) \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^2$, предложенное в [14, 15], где $k = \frac{\rho_s}{\rho}$, k_0 – начальная пористость, P_c – давление компактирования (закрытия пор).

И тогда выражение для уменьшения поврежденности $\omega = 1 - \frac{1}{k}$ записывается в виде:

$$\omega = \omega_0 \left[1 - \frac{P}{P_c}\right]^2 \frac{1}{1 - \omega_0 + \omega_0 \left[1 - \frac{P}{P_c}\right]^2}, \quad (1)$$

где ω_0 – значение поврежденности в сечении образца перед началом компактирования, P – напряжение в ударной волне. При $P > P_c$ $\omega = 0$.

Численное моделирование всех экспериментов на откольное разрушение и компактирование латуни, результаты которых приведены в [1], проводилось по программе УП [16]. Расчетная схема экспериментальной сборки показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчетов

Плотность счетных точек в ударнике, экране, образце составляла 200 на 1 мм, в подложке – 50 на 1 мм.

Для латуни в качестве УРС использовалось уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена, для описания упругопластического поведения – дислокационная модель с упрочнением, кинетика пластического деформирования в которой определяется уравнением Орована [17].

1. Результаты численного моделирования экспериментов по откольному разрушению образцов из латуни

Результаты численного моделирования в виде динамики роста поврежденности $\omega(x)$ по толщине образца и результаты металлографического анализа, сохраненных после опытов образцов, приведены на рис. 2–6.

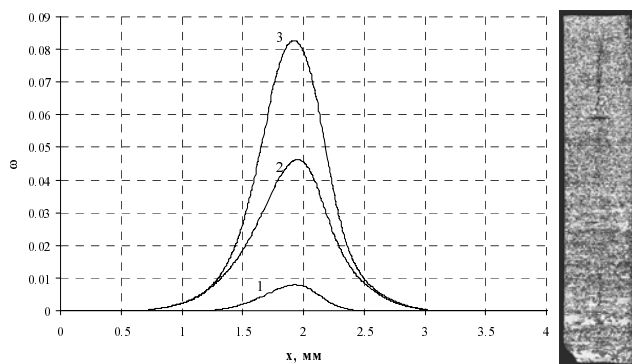


Рис. 2. Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ($W_{уд} = 165$ м/с): 1 – 2,3 мкс, 2 – 2,7 мкс, 3 – 3,5 мкс

Как видно из результатов, приведенных на рисунках, с увеличением скорости соударения конечная поврежденность образцов возрастает от $\omega \sim 0,08$, что соответствует цепочке пор, до $\omega \sim 0,17$, что соответствует магистральной трещине.

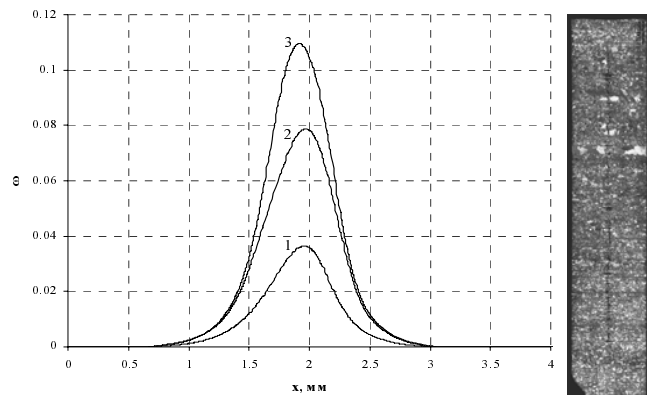


Рис. 3. Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ($W_{уд} = 187$ м/с): 1 – 2,5 мкс, 2 – 2,9 мкс, 3 – 3,7 мкс

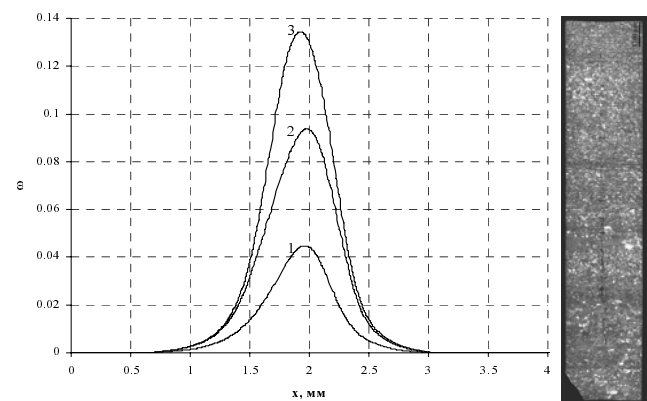


Рис. 4. Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ($W_{уд} = 207$ м/с): 1 – 2,5 мкс, 2 – 2,9 мкс, 3 – 3,7 мкс

По полученным распределениям поврежденности были определены максимальные расчетные значения ω_{max} , которые соответствовали различным степеням разрушения образцов из латуни: $\omega_{max} = 0,082$ ($W_{уд} = 165$ м/с) и $\omega_{max} = 0,11$ ($W_{уд} = 187$ м/с) – отдельные поры; $\omega_{max} = 0,13$ ($W_{уд} = 207$ м/с) и $\omega_{max} = 0,16$ ($W_{уд} = 227$ м/с) – отдельные поры и объединение пор; $\omega_{max} = 0,17$ ($W_{уд} = 237$ м/с) – образование магистральной трещины. Сопоставляя значения, полученные при численном моделировании экспериментов, с результатами визуального постопытного анализа со-

храненных после опытов образцов, была сделана оценка величины критической поврежденности $\omega_{кр}$, которая составила $\omega_{кр} = 0,17$. Этому значению поврежденности соответствует стадия разрушения, характеризующаяся образованием магистральной трещины в латунном образце.

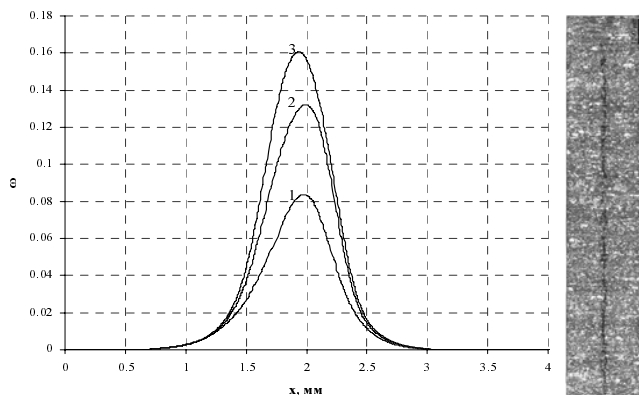


Рис. 5. Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ($W_{уд} = 227$ м/с): 1 – 2,7 мкс, 2 – 3,1 мкс, 3 – 3,9 мкс

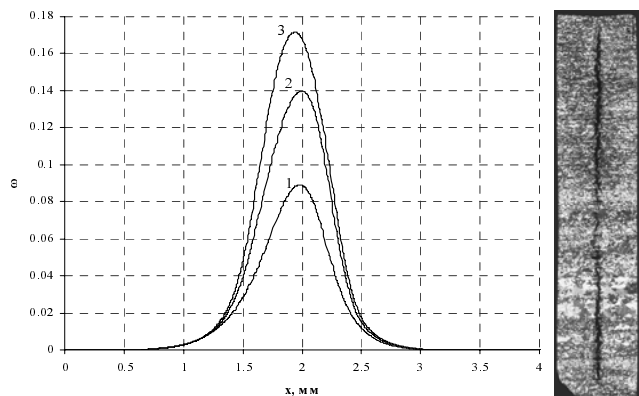


Рис. 6. Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа ($W_{уд} = 237$ м/с): 1 – 2,7 мкс, 2 – 3,1 мкс, 3 – 3,9 мкс

2. Результаты численного моделирования экспериментов по компактированию предварительно разрушенных образцов из латуни

Численное моделирование процесса компактирования образцов из латуни, имеющих различную начальную степень поврежденности (поврежденность создавалась в опытах на откольное раз-

рушение при $W_{уд} = 187$ м/с (образец 1) и 227 м/с (образец 2)), проводилось с использованием уравнения (1). В уравнении $\omega_0(x)$ бралось как распределение поврежденности, полученное в расчетах на откол на конечный момент времени (см. рис. 3, 5). Значение параметра P_c (давление компактирования) – напряжение в ударной волне, превышение которого приводит к полному «залечиванию» поврежденного образца, оценивалось по результатам экспериментально-расчетного исследования компактирования латуни, проведенного в рамках данной работы.

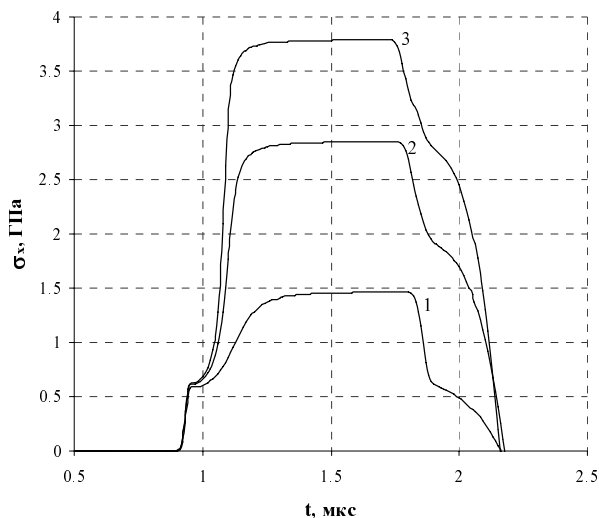


Рис. 7. Профили волны нагружения в срединном сечении образца: 1 – $W_k = 94$ м/с, 2 – $W_k = 182$ м/с, 3 – $W_k = 240$ м/с

В опытах на компактирование в поврежденных образцах напряжение нагружения σ_0 по результатам расчетов, представленным на рис. 7, изменялось от 1,5 до 3,75 ГПа. При таких уровнях

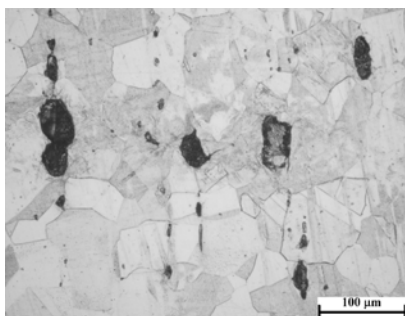
нагружения, согласно экспериментальным результатам, процесс компактирования проходит стадии от начала схлопывания дефектов до полного «залечивания» образца.

Согласно приведенным результатам расчетов и данным о степени остаточного разрушения образцов из латуни (рис. 8) было получено: при $\sigma_0 \approx 1,5$ ГПа ($W_k = 91$ и 94 м/с) поврежденность в обоих образцах (образец 1 – начальная поврежденность $\omega_{max} = 0,11$; образец 2 – $\omega_{max} = 0,16$) уменьшилась, но дефектная структура с отдельными порами еще достаточно различима; при $\sigma_0 \approx 2,8$ ГПа ($W_k = 182$ и 172 м/с) в образце 1 поврежденность уменьшилась практически до нуля, в образце 2 поврежденность представляет отдельные слабозаметные дефекты; при $\sigma_0 \approx 3,75$ ГПа ($W_k = 240$ и 237 м/с) в образце 1 и в образце 2 дефекты полностью отсутствуют.

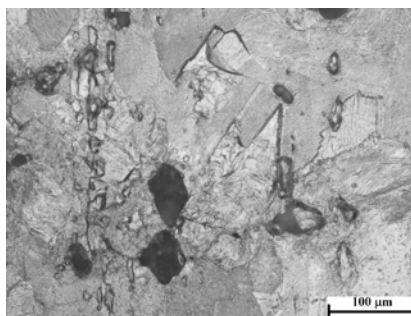
Таким образом, сопоставив результаты расчетов с имеющимися данными о структуре образцов из латуни, видим, что значение P_c находится в интервале от $\sim 2,8$ до $\sim 3,75$ ГПа и зависит от степени начальной поврежденности образца. Очевидно, этот интервал значений P_c может быть значительно сужен, но в нашем распоряжении были результаты только трех экспериментов, поэтому дальнейшие модельные расчеты проводились с $P_c = 2,8$ ГПа для начальной поврежденности $\omega_{max} = 0,11$ и с $P_c = 3,75$ ГПа для начальной поврежденности $\omega_{max} = 0,16$.

На рис. 9, 10 для каждого опыта приведены начальная поврежденность $\omega_0(x)$ и конечная поврежденность после прохождения ударной волны зоны разрушения.

Образец 1

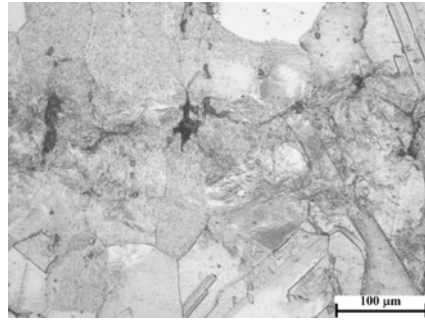
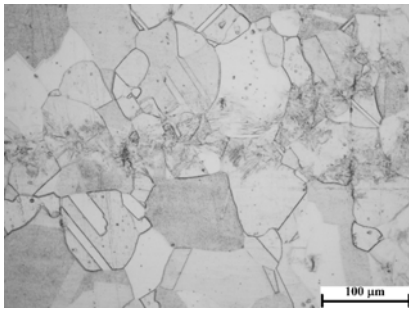


Образец 2

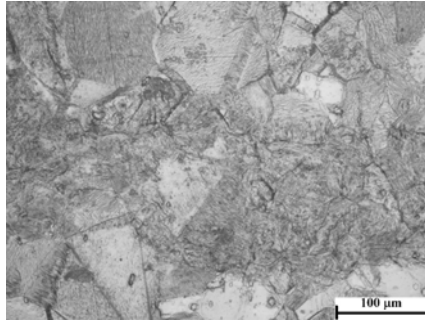
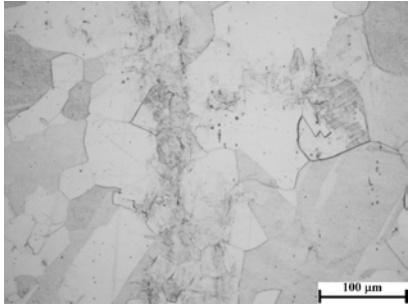


$\sigma_0 = 1,5$ ГПа

Рис. 8. Фрагменты шлифов поперечных срезов латунных образцов после опыта на компактирование при увеличении 200х (окончание на с. 14)



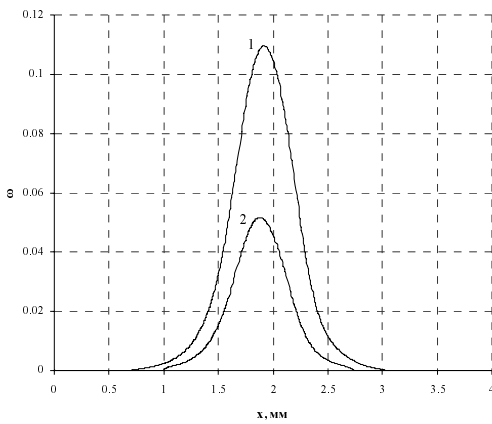
$\sigma_0 = 2,8$ ГПа



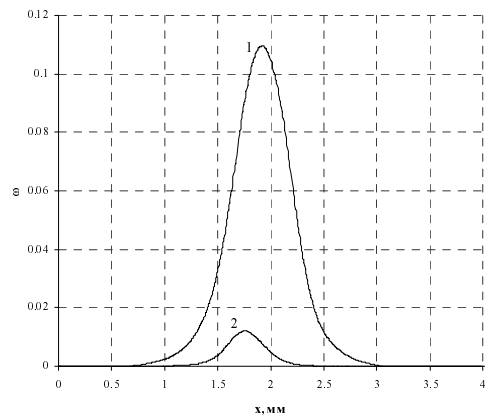
$\sigma_0 = 3,75$ ГПа

Рис. 8. Окончание

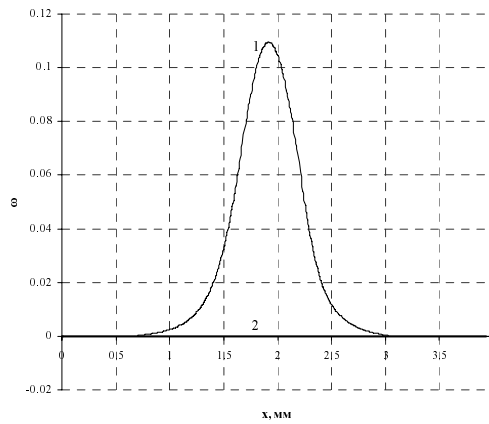
Образец 1



а



б



в

Рис. 9. Распределение поврежденности по толщине образца: начальная откольная (поврежденность $W_{уд} = 187$ м/с); после компактирования ($W_k = 91$ (а), 182 (б), 240 (в) м/с).
1 – начальная поврежденность, 2 – конечная поврежденность

Образец 2

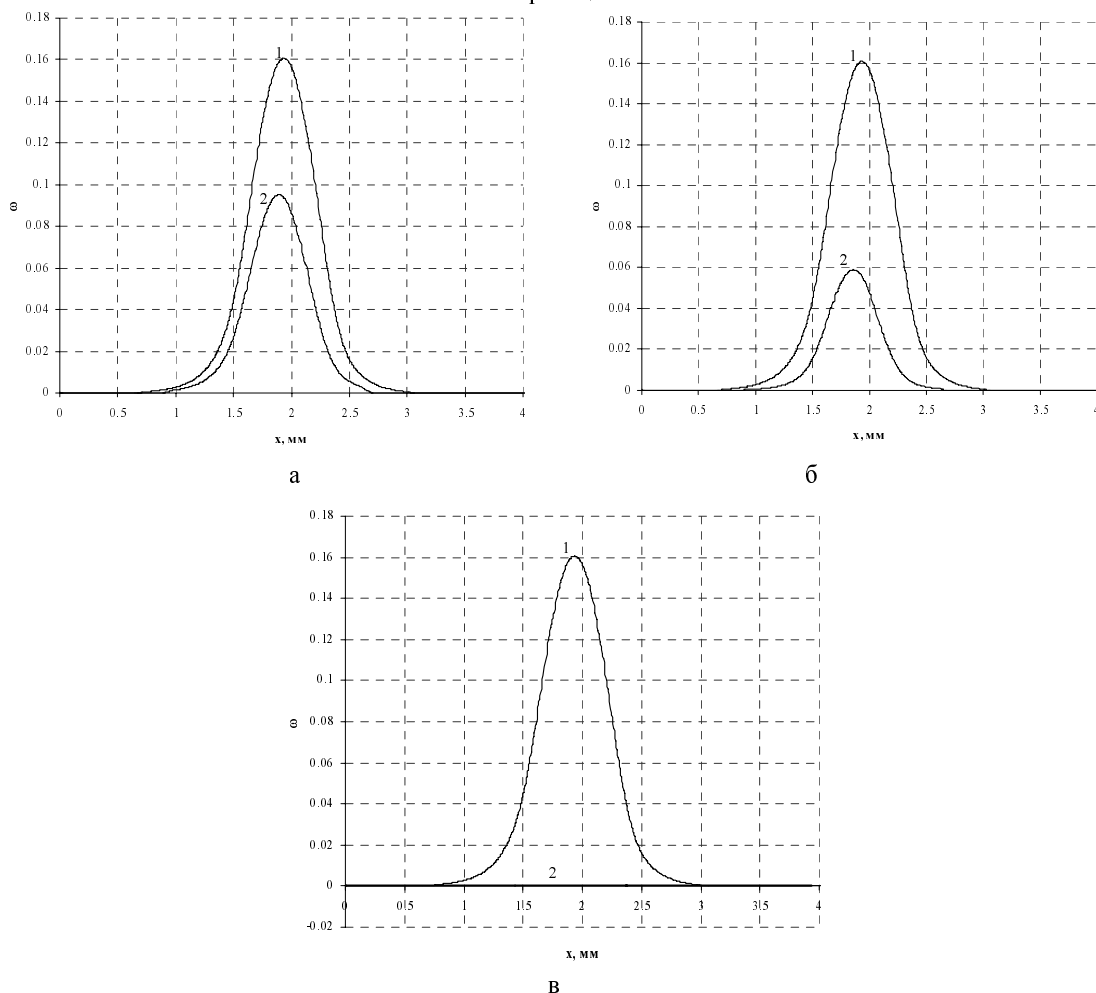


Рис. 10. Распределение поврежденности по толщине образца: начальная откольная поврежденность ($W_{уд} = 227$ м/с); после компактирования ($W_k = 94$ (а), 172 (б), 237 (в) м/с): 1 – начальная поврежденность, 2 – конечная поврежденность

Как следует из результатов расчетного моделирования опытов на компактирование поврежденных образцов из латуни, при нагружении ударной волной амплитудой $\sigma_0 = 1,5$ ГПа в образце 1 поврежденность ω уменьшилась \sim в 2,2 раза, в образце 2 – в 1,8 раза. При нагружении ударной волной амплитудой $\sigma_0 = 2,8$ ГПа в образце 1 поврежденность уменьшилась практически до нуля, в образце 2 – в 2,7 раза. При нагружении ударной волной амплитудой $\sigma_0 = 3,75$ ГПа в образце 1 и в образце 2 поврежденность уменьшилась до нуля.

Заключение

На примере латуни рассмотрен экспериментально-расчетный метод исследования откольного разрушения и компактирования, который позволяет

дать количественные оценки параметров моделей откольного разрушения и компактирования металлов: параметр $\omega_{кр}$ (критическая поврежденность), отвечающий за переход с уровня незначительной внутренней поврежденности материала к уровню образования магистральной трещины; параметр P_c (давление компактирования) превышение которого сжимающим напряжением приводит к полному «залечиванию» поврежденного образца.

Список литературы

1. Трунин И. Р., Терешкина И.А., Подурец А. М. и др. Откольное разрушение и компактирование латуни Л63. Экспериментальные исследования // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2016. Вып. 2. С. 53–58.

2. Ахмадеев Н. Х. Исследование откольного разрушения при ударном деформировании // ПМТФ. 1980, № 4. С. 158–167.
3. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит. 2008.
4. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, № 11. P. 4814–4826.
5. Curran D., Seaman L., Shockey A. Dynamic failure of solids // Phys. Reports. 1987. Vol. 47, № 5–6. P. 253–388.
6. Глушак Б. Л., Трунин И. Р. и др. Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике. ВНИИЭФ. 1995. С. 59–122.
7. Трунин И. Р., Терешкина И. А. Некоторые вопросы теории, эксперимента и численного моделирования откольного разрушения металлов: Препринт № 113. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013.
8. Гусева М. А., Иванова Г. Г., Терешкина И. А., Трунин И. Р. Численное моделирование откольного разрушения и компактирования стали // Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел «Упругость и неупругость». 2016. С. 298–302.
9. Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н. и др. Кинетическая модель пластического разрушения с учетом диссипативных процессов // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2001. Вып. 2. С. 35–40.
10. 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.
11. 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.
12. Трунин И. Р., Терешкина И. А., Симаков В. Г. и др. Компактирование меди и стали при ударном нагружении // Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. 2015. С. 453–460.
13. Подурец М. А. Термодинамическая модель пористого тела. Математическое моделирование. 1996. 8, № 2. 29 с.
14. Воропинов А. И., Илькаева Л. А., Подурец М. А., Симаков Г. В., Трунин Р. Ф. Ударные адиабаты пористых алюминия, титана, меди и вольфрама и адиабаты Пуассона пористых меди и вольфрама в области неполного закрытия пор. Термодинамическая модель и эксперимент // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2005. Вып. 1–2. С. 45–50.
15. Butcher B. M., Karnes C. H. Research Report SC-RR-67-3040. Sandia Laboratory. Albuquerque. NM. 1968. Из книги Stefan Hiermaier «Structures under crash and impact. Continuum mechanics, discretization and experimental characterization». Springer. 2010.
16. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И. и др. 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. С. 11–14.
17. Гилман Д. Д. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии: Пер. с англ. Механика. 1970. Т. 120, № 2. С. 96–124.

Статья поступила в редакцию 29.06.2016