

ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ И КОМПАКТИРОВАНИЕ ЛАТУНИ Л63. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

И.А. Терешкина^{1,2}, И.Р. Трунин^{1,2}, В.Г. Симаков^{1,2}, А.М. Подурец^{1,2}, В.А. Брагунец¹,
Ю.В. Батьков², И.Н. Кондрохина¹, М.И. Ткаченко^{1,2}, Г.Г. Иванова¹,
М.А. Десятникова¹, А.В. Цветков¹

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

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

Введение

Исследование механизмов разрушения и последующего компактирования материалов при импульсных ударно-волновых нагрузках представляет большой интерес для практических приложений.

Одним из типов разрушения динамическими нагрузками является откольное разрушение, вызываемое развитием кратковременных растягивающих напряжений внутри тела, образованных взаимодействием встречных волн разрежения [1], [2], [3]. Особый интерес также представляет вопрос о восстановлении сплошности (компактировании) в процессе, например, повторного нагружения разрушенного образца [4], [5].

Изучение механизмов разрушения и компактирования, математическое моделирование этих процессов является сложной задачей, для решения которой требуется получение большого объема экспериментальной информации и разработка численных моделей, описывающих указанные процессы.

В настоящей работе выполнены экспериментально-расчетные исследования внутреннего откольного разрушения и последующего компактирования в процессе повторного нагружения образцов из латуни марки Л63 ГОСТ 15527-2004 (Cu~ 63%, Zn~ 37%), ударно нагруженных плоскими ударниками. Выбор в качестве исследуемого материала латуни Л63 был обусловлен его механическими свойствами и характером разрушения. Латунь Л63 – двойной медный сплав с основным легирующим элементом – цинком. По сравнению с медью обладает более высокой прочностью и коррозионной стойкостью, но меньшей тепло и электропроводностью.

1 Постановка экспериментов и результаты опытов по откольному разрушению

Схема постановки опытов приведена на рисунке 1 (материал ударника, экрана, кольца и образца – латунь, подложка – фторопласт; все размеры сборки в миллиметрах приведены на рисунке).



Рисунок 1 – Схема эксперимента

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 постопытного металлографического анализа.

С латунными образцами было проведено пять опытов, в которых для создания внутренней поврежденности образцы нагружались ударниками со скоростями $W_{\text{уд}} \sim 165, 187, 207, 227$ и 237 м/с.

После опытов сохраненные образцы разрезались, и исследовались шлифы их поперечных сечений. На рисунке 2 приведены изображения поврежденных участков в диаметральных поперечных срезах сохранённых в пяти опытах образцов из латуни с увеличением $200\times$.

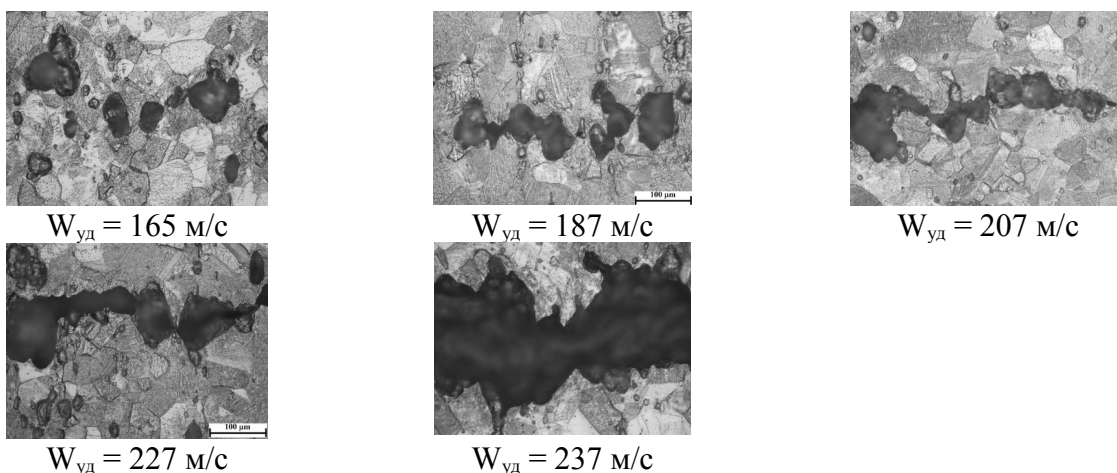


Рисунок 2 – Результаты металлографического анализа латунного образца после опыта на откол

Как следует из рисунка 2, в срединных сечениях образцов образовалась зона с пористой структурой, где видны следы повреждений – нарушения сплошной структуры материала образца, к которой прилегают две неповреждённые части образца.

С помощью металлографического анализа поперечного среза образцов удалось определить их степень разрушения:

- при скорости нагружения $W_{уд} = 165$ м/с видны отдельные дефекты – поры, имеющие приблизительно сферическую форму, что характерно для вязкого типа разрушения;
- при скоростях нагружения $W_{уд} = 187, 207$ м/с соседние поры объединяются, увеличиваются в размерах, образуя в некоторых частях среза микротрещины;
- при скоростях нагружения $W_{уд} = 227, 237$ м/с все дефекты сливаются, и по всему сечению образца образуется магистральная трещина, которая разделяет образец на две части.

Все дальнейшие экспериментально-расчетные исследования откольного разрушения и компактирования латуни проводились на образцах, имеющих предварительную внутреннюю откольную поврежденность, полученную в опытах на откольное разрушение с $W_{уд} = 187$ и 227 м/с.

2 Результаты численного моделирования экспериментов по откольному разрушению образцов из латуни

Моделирование экспериментов по откольному разрушению образцов из латуни проводилось с использованием модели разрушения NAG [6], в которой в качестве меры поврежденности выбран скалярный параметр $\omega = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$ (ρ – плотность материала с дефектами, ρ_s – плотность сплошного материала), и которая успешно применяется авторами при моделировании разрушения на встречных волнах разгрузки различных материалов [7], [8], [9]. 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 [10], 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 $\omega_{кр}$.

Результаты численного моделирования в виде динамики роста поврежденности $\omega(x)$ по толщине образца для опытов при скоростях нагружения $W_{уд} = 187, 227$ м/с и результаты металлографического анализа, сохранённых после опытов образцов, приведены на рисунке 3.

Как видно из результатов, приведенных на рисунке 3, с увеличением скорости соударения конечная поврежденность образцов возрастает от $\omega \sim 0,11$, что соответствует цепочке пор, до $\omega \sim 0,16$, что соответствует магистральной трещине.

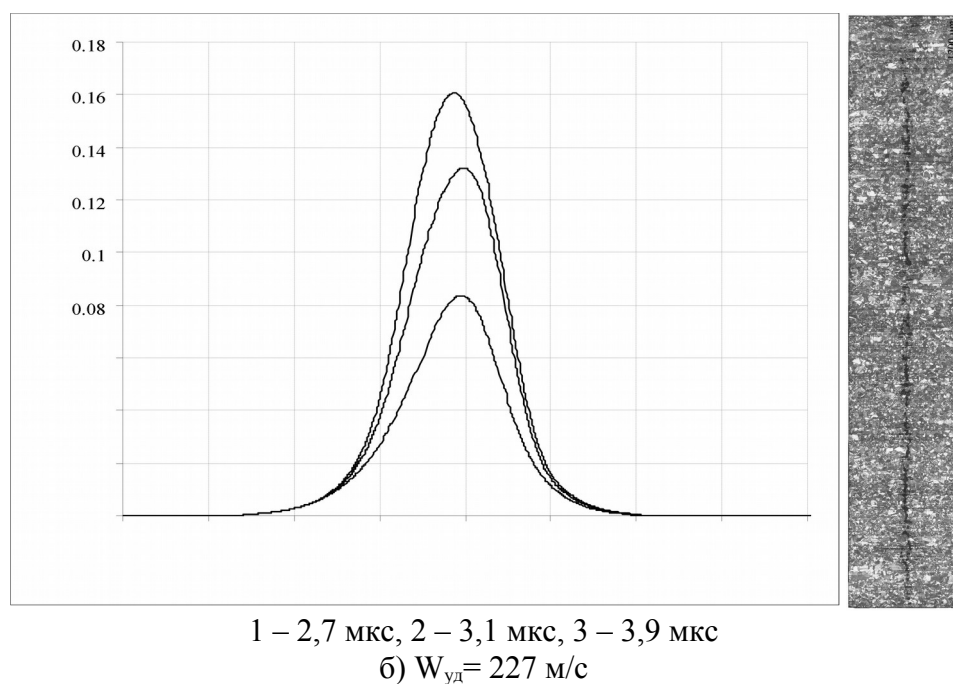
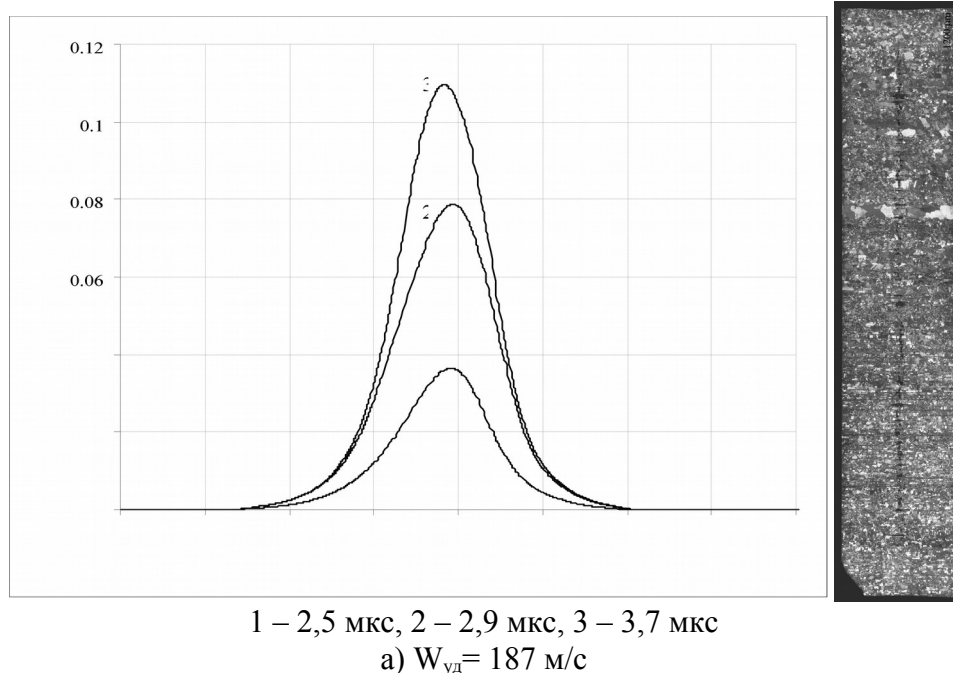


Рисунок 3 – Распределение поврежденности по толщине образца на различные моменты времени и результаты металлографического анализа

По полученным распределениям поврежденности были определены максимальные расчетные значения ω_{max} , которые соответствовали различным степеням разрушения образцов из латуни: $\omega_{max} = 0,11$ ($W_{уд} = 187$ м/с) – отдельные поры и объединение пор; $\omega_{max} = 0,16$ ($W_{уд} = 227$ м/с) – образование магистральной трещины.

3 Результаты опытов по компактированию

Экспериментальное исследование процесса компактирования латуни проводилось на образцах, имеющих предварительную внутреннюю откольную поврежденность. Было подготовлено по 3 образца с различными степенями разрушения, которые соответствовали уровню поврежденности, полученному в опытах на откольное разрушение с $W_{уд} = 187$ и 227 м/с.

Образцы с заданной внутренней поврежденностью помещались в экспериментальные сборки по схеме, показанной на рисунке 1. Отличие от схемы экспериментов на откольное разрушение заключалось в замене фторопластовой подложки, расположенной за образцом, на латунную, что позволило исключить образование волны разрежения на границе раздела образец – подложка и, следовательно, повторного образования откольного разрушения. Таким образом, предварительно разрушенный образец должен компактироваться проходящей ударной волной.

В опытах на компактирование скорость нагружения составила:

- 1) $W_k=91$ м/с, $W_k=182$ м/с и $W_k=240$ м/с для образцов с заданной поврежденностью, полученной при $W_{уд} \approx 187$ м/с ± 8 м/с;
- 2) $W_k=94$ м/с, $W_k=172$ м/с и $W_k=237$ м/с для образцов с заданной поврежденностью при $W_{уд} \approx 227$ м/с ± 4 м/с.

Так же, как и в опытах на откольное разрушения, проводился металлографический анализ сохранных после опытов образцов.

На рисунках 4, 5 приведены изображения участков поперечных срезов сохранных в экспериментах на откол и компактирование латунных образцов с увеличением 200х.

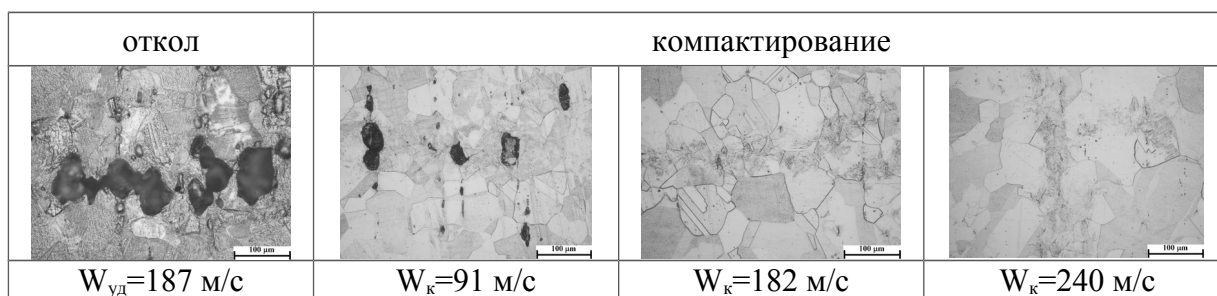


Рисунок 4 – Фрагменты шлифов поперечных срезов латунных образцов после опыта на откол и после опытов на компактирование

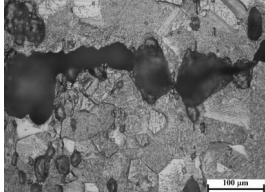
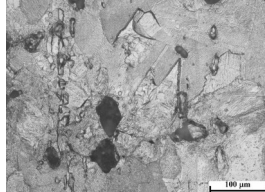
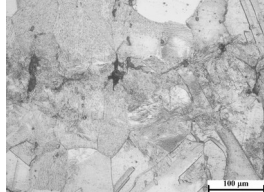
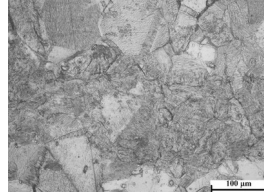
| ОТКОЛ | компактирование | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| $W_{уд}=227$ м/с | $W_к=94$ м/с | $W_к=172$ м/с | $W_к=237$ м/с |

Рисунок 5 – Фрагменты шлифов поперечных срезов латунных образцов после опыта на откол и после опыта на компактирование.

Как следует из рисунков 4 и 5, во всех опытах ударное нагружение заранее поврежденных образцов привело к уменьшению поврежденности. При скоростях нагружения $W_к \sim 90$ м/с, согласно полученным изображениям, в образцах с различной степенью начальной поврежденности заметны дефекты в виде отдельных пор; при скорости соударения $W_к \sim 170 \div 180$ м/с – можно различить участки шлифа с микроповреждениями; при $W_к \sim 240$ м/с микродефекты полностью отсутствуют, и в области откольного разрушения остается только «след» в виде затемнения зоны компактирования.

4 Результаты численного моделирования экспериментов по компактированию предварительно разрушенных образцов из латуни

Модель компактирования поврежденной среды, которая использовалась при моделировании экспериментов с латунью, базируется на известном представлении

функции пористости от давления $k(P) = 1 + (k_0 - 1) \cdot \left(1 - \frac{P}{P_c}\right)^2$, предложенном в [11-13], 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:

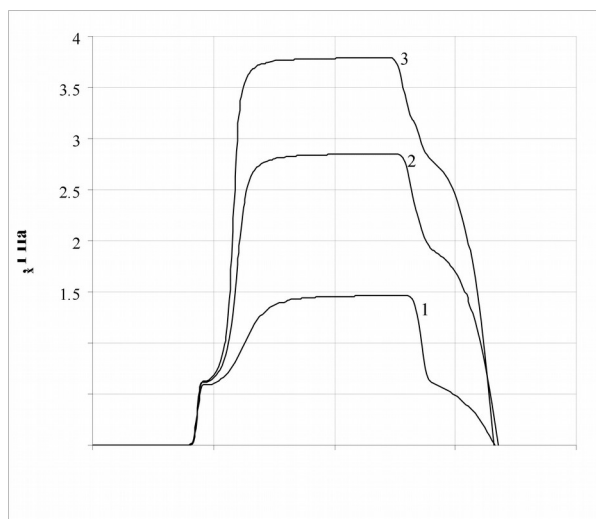
$$\omega = \omega_0 \left[1 - \frac{P}{P_c}\right]^2 \frac{1}{1 - \omega_0 + \omega_0 \left[1 - \frac{P}{P_c}\right]^2},$$

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

В уравнении $\omega_0(x)$ бралось как распределение поврежденности, полученное в расчетах на откол на конечный момент времени (см. рисунок 3). 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.

В опытах на компактирование в поврежденных образцах амплитуда ударной волны (σ_0) по результатам расчетов, представленным на рисунке 6, изменялась 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.



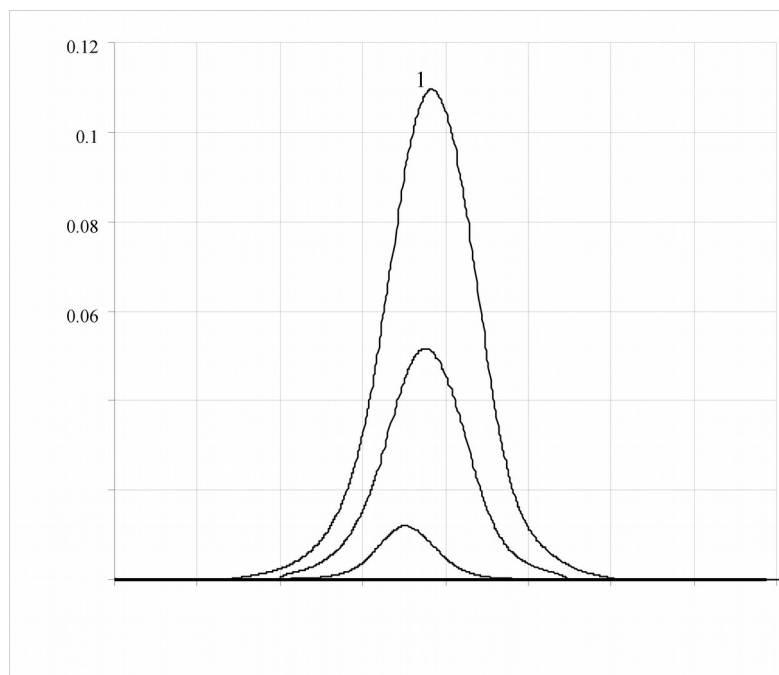
1 – $W_k = 94$ м/с, 2 – $W_k = 182$ м/с, 3 – $W_k = 240$ м/с

Рисунок 6 – Профили волны нагружения в срединном сечении образца

Согласно приведенным результатам расчетов и данным о степени остаточного разрушения образцов из латуни (см. рисунки 4, 5) было получено: при $\sigma_0 \sim 1,5$ ГПа ($W_k = 91$ и 94 м/с) поврежденность в обоих образцах уменьшилась, но дефектная структура с отдельными порами еще достаточно различима; при $\sigma_0 \sim 2,8$ ГПа ($W_k = 182$ и 172 м/с) в образце ($W_{уд} = 187$ м/с) поврежденность уменьшилась практически до нуля, в образце ($W_{уд} = 227$ м/с) поврежденность представляет отдельные слабозаметные дефекты; при $\sigma_0 \sim 3,75$ ГПа ($W_k = 240$ и 237 м/с) в обоих образцах дефекты полностью отсутствуют.

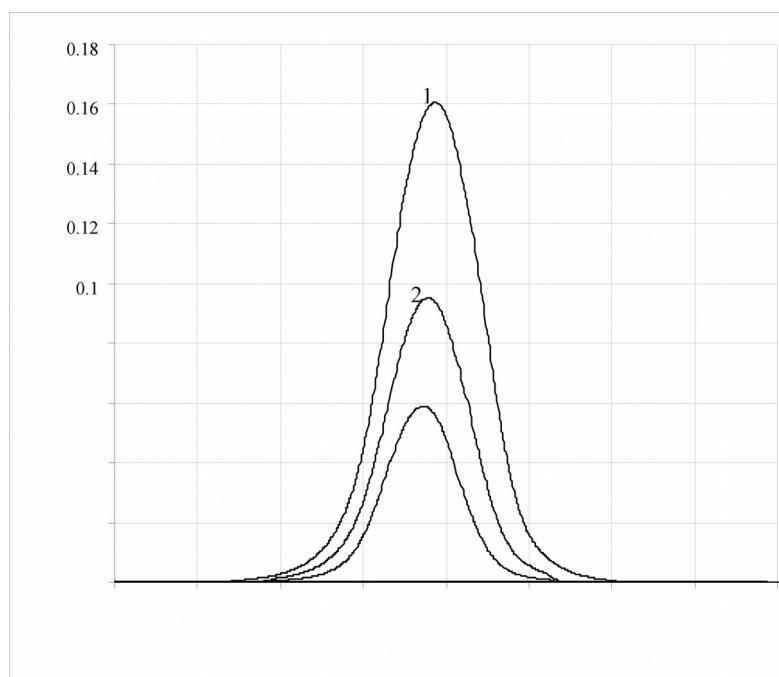
Таким образом, сопоставив результаты расчетов с имеющимися данными о структуре образцов из латуни, значение P_c находится в интервале от $\sim 2,8$ ГПа до $\sim 3,75$ ГПа и зависит от степени начальной поврежденности образца. Очевидно, этот интервал значений P_c может быть значительно сужен, но в нашем 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 рисунках 7, 8 для каждого опыта приведены начальная поврежденность $\omega_0(x)$ и конечная поврежденность после прохождения ударной волны зоны разрушения.



1 – начальная поврежденность ($W_{уд}=187$ м/с), 2 – поврежденность при $W_k=91$ м/с,
3 – поврежденность при $W_k=182$ м/с, 4 – поврежденность при $W_k=240$ м/с

Рисунок 7 – Распределение поврежденности по толщине образца



1 – начальная поврежденность ($W_{уд}=227$ м/с), 2 – поврежденность при $W_k=94$ м/с,
3 – поврежденность при $W_k=172$ м/с, 4 – поврежденность при $W_k=237$ м/с

Рисунок 8 – Распределение поврежденности по толщине образца

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 ($W_{уд}=187$ м/с) поврежденность ω уменьшилась \sim в 2,2 раза, в образце

($W_{уд}=227$ м/с) – в 1,8 раза. При нагружении ударной волной амплитудой $\sigma_0= 2,8$ ГПа в образце ($W_{уд}=187$ м/с) поврежденность уменьшилась практически до нуля, в образце ($W_{уд}=227$ м/с) – в 2,7 раза. При нагружении ударной волной амплитудой $\sigma_0= 3,75$ ГПа в обоих образцах 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. Прочность и ударные волны. Сб. статей под редакцией Новикова С.А. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 1996. 573 с.
2. Иванов А.Г. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. Монография. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 2001. 482 с.
3. Kanel G. I. Spall fracture: methodological aspects, mechanisms and governing factors. Int. J. Fracture. 2010. №163. 173-191 p.
4. 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. 109-113 с.
5. 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. 20-32 с.
6. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture. J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, №11. 4814-4826p.
7. Глушак Б.Л., Трунин И.Р. и др. Численное моделирование откольного разрушения металлов. Фракталы в прикладной физике. ВНИИЭФ. 1995. 59-122 с.
8. Трунин И.Р., Терешкина И.А. Некоторые вопросы теории, эксперимента и численного моделирования откольного разрушения металлов. Препринт 113. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013. 37 с.
9. 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. 298-302 с.
10. 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. 35-40 с.
 11. Подурец М.А. Термодинамическая модель пористого тела. Математическое моделирование. 1996. 8, № 2. 29 с.
 12. Воропинов А.И., Ильяева 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. 45-50 с.
 13. Butcher В.М., Karnes С.Н. 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. 410 p.