

Особенности стадии зарождения поврежденности при интенсивном нагружении меди

Ю. В. Батьков, О. Н. Игнатова,
И. Н. Кяжкина, А. Н. Малышев,
С. С. Надежин, П. Н. Низовцев,
В. А. Огородников, С. А. Новиков,
А. М. Подурец, В. А. Раевский,
В. И. Скоков, И. А. Терешкина,
О. А. Тюпанова

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния типа нагружения (ударная или квазиизэнтропическая волна сжатия) на зарождение и рост поврежденности меди, особенности стадии зарождения поврежденности при интенсивном динамическом нагружении, результаты численного моделирования процессов. Моделирование проводилось по различным математическим программам с использованием релаксационной модели прочности и кинетической модели откольного разрушения.

Введение

Исследования физических и механических свойств конструкционных материалов в условиях интенсивного динамического нагружения привлекают все большее внимание исследователей. Используемые на сегодняшний день модели сдвиговой и откольной прочности являются полупирическими и не учитывают ряд факторов, происходящих на микроуровне. Одним из таких факторов является состояние материала после прохождения по нему ударной и квазиизэнтропической волны сжатия.

В работе [1] обнаружено, что предварительное нагружение меди волнами сжатия (ударной и квазиизэнтропической) приводит к значительному увеличению сдвиговой и откольной прочности по сравнению с ненагруженным состоянием. Большее увеличение прочности наблюдается при ударно-волновом предварительном нагружении меди, сопровождающимся появлением в зернах квазипериодических полос локализованной деформации [2].

Целью данной работы явилось исследование расчетно-экспериментальным методом процесса зарождения и развития поврежденности при двух различных типах нагружения – ударно-волновом и квазиизэнтропическом.

1. Исследование зарождения и развития поврежденности в предварительно нагруженных образцах

Для исследования процесса зарождения и развития поврежденности выбрана медь марки М1 с исходным размером зерна ~ 110 мкм. Образцы вырезались из листа, отжигались при $T = 550$ °С в течение 30 мин и охлаждались на воздухе.

Постановка экспериментов. Из результатов экспериментов известно, что в металлах в ударной волне определенной (критической) интенсивности развиваются полосы локализованной деформации и происходит временная потеря прочности [2, 3]. Внутренняя структура полос пока детально не исследована. Возможно, они представляют собой зоны, в которых развивается более интенсивная деформация за счет повышенного локального разогрева.

По расчетам критическая интенсивность ударной волны в меди составляет 27–30 ГПа, при этом скорость деформации достигает $\sim 10^8$ – 10^{10} с⁻¹ [2]. Однако при такой же интенсивности, но при скорости деформации $\sim 10^5$ – 10^7 с⁻¹ полосы локализованного сдвига не образуются. Такое нагружение является квазиизэнтропическим.

Исследование зарождения и развития поврежденности в предварительно нагруженных образцах проводилось в два этапа:

– 1-й этап: нагружение образцов ударной или квазиизэнтропической волной амплитудой 27–30 ГПа. Предварительное нагружение осуществляется таким образом, что в образце не реализуется каких-либо значительных растягивающих напряжений и сохраняется его целостность;

– 2-й этап: исследование сопротивления действию растягивающих напряжений образцов при нагружении ударной волной малой амплитуды с последующей разгрузкой в «мягкую» преграду и реализацией растягивающих напряжений невысокой амплитуды ($\sigma_{\text{раст}} \approx 1,2$ – $1,6$ ГПа).

Для исследования условий зарождения поврежденности (разрывов сплошности) в меди, предварительно подвергнутой ударно-волновому или квазиизэнтропическому нагружению, применяется следующая схема постановки опытов: торможение низкоскоростного ударника (из одноименного материала) на неподвижном образце, за которым расположена подложка с меньшим динамическим импедансом ($\rho_0 C_0$). Для ускорения ударника применялась баллистическая ударная труба (БУТ) [4].

Результаты металлографических исследований. Испытанные образцы исследовались на металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-31. Поврежденность в образцах определялась отношением общей длины пор к длине мерной линейки. На рис. 1 представлена зависимость максимальной поврежденности от скорости ударника. Из рисунка видно, что предварительное нагружение меди волнами сжатия (ударной и квазиизэнтропической) приводит к значительному увеличению откольной прочности. Наибольшее увеличение откольной прочности (зарождение поврежденности) наблюдается при ударно-волновом предварительном нагружении меди, сопровождающимся появлением в зернах квазипериодических полос локализованной деформации.

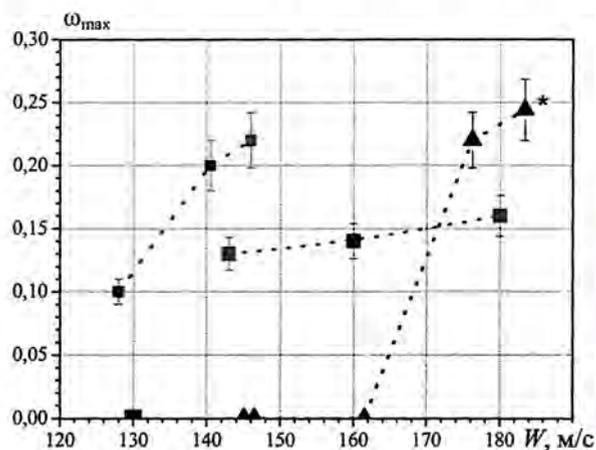


Рис. 1. Зависимость максимальной поврежденности от скорости ударника: ■ – неагруженная медь; ■ – медь после квазиизэнтропического нагружения; ▲ – медь после ударно-волнового нагружения

2. Исследование зарождения поврежденности при ударно-волновом и квазиизэнтропическом нагружении

Постановка экспериментов. Схема экспериментов выбрана таким образом, чтобы в медном образце реализовались следующие условия:

- давление в ударной или квазиизэнтропической волне сжатия $P \sim 32$ ГПа выше критического значения перехода к гетерогенному режиму деформирования;
- реализация растягивающих напряжений интенсивностью $\sigma_p \leq -1,8$ ГПа с разным временем действия ($t = 0,5-1$ мкс) в образце с помощью вариации величиной зазора между образцом и подложкой.

В результате численного моделирования (см. п. 3) обнаружено, что после захлопывания зазора в образце за волной разгрузки распространяется волна сжатия, которая затухает по мере продвижения по поврежденному образцу и приводит к закрытию пор, образующихся в области, близкой к тыльной поверхности. В середине образца волна сжатия мала и практически не влияет на развитие поврежденности. Следовательно, состояние образца можно разделить на четыре зоны, отсчитываемые от нагружаемой поверхности:

- сплошной неповрежденный материал (1);
- поврежденный материал (2);
- поврежденный материал с последующим компактированием (3);
- сплошной неповрежденный материал (откольный слой) (4).

В данной постановке проведено шесть экспериментов с различной вариацией зазора: $\Delta_3 = 140-420$ мкм.

Результаты металлографических исследований образцов. Результат измерения поврежденности по всей плоскости образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению до давления $P \sim 30$ ГПа с последующей разгрузкой в зазор $\Delta_3 = 300$ мкм представлен на трехмерной диаграмме (рис. 2).

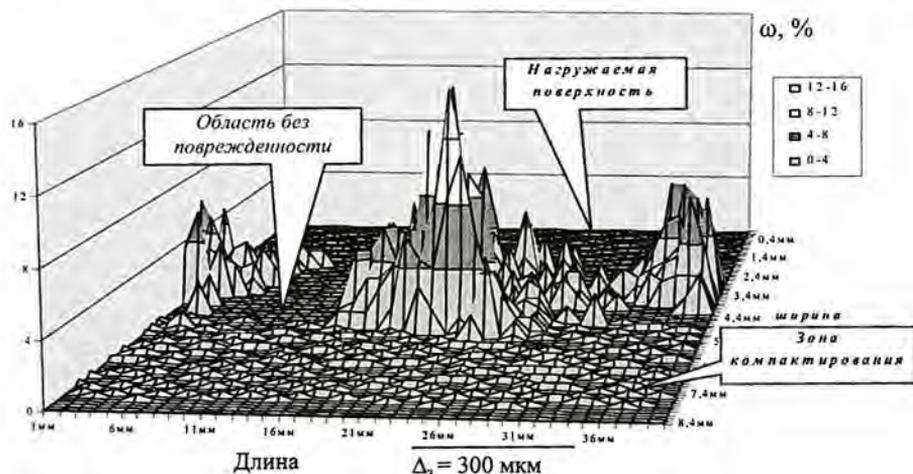


Рис. 2. Распределение поврежденности по плоскости образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению $P \sim 30$ ГПа с последующей разгрузкой в зазор $\Delta_3 = 300$ мкм

Как видно из рис. 2, поврежденность носит немонотонный характер: в образце чередуются области значительной поврежденности ($\omega \sim 0,07-0,16$) и области $\sim 4-5$ мм, вообще не содержащие следов поврежденности ($\omega = 0$). Таким образом, поврежденность локализуется в отдельных зонах. Аналогичная ситуация прослеживается и в других образцах, подвергнутых как ударно-волновому, так и квазиизэнтропическому нагружению при $\omega \sim 0,07-0,16$.

В образцах также хорошо видны полосы, которые представляют собой, по-видимому, результаты закрытия пор волной сжатия, следующей за волной разгрузки.

Причина локализации поврежденности в этих экспериментах пока не ясна. Можно только определенно сказать, что есть некий критический уровень поврежденности (или параметров волны растяжения – амплитуда $\sigma_p \leq -1,8$ ГПа и время действия $t = 0,5-1$ мкс), при которой происходит ее немонотонный рост. При $t > 1$ мкс распределение поврежденности носит достаточно монотонный характер.

3. Численное моделирование проведенных экспериментов

Выполненные экспериментальные исследования сопровождались численным моделированием по одномерной программе УП-ОК [5] и двумерной программе ДРАКОН [6] с использованием релаксационной модели сдвиговой прочности (РИНГ) [7] и кинетической модели откольной прочности. Ниже кратко приводится описание используемой модели откольной прочности и константы.

Модель откольной прочности. Для описания процессов зарождения и развития поврежденности (откольного разрушения) в меди использована двухстадийная микростатистическая кинетическая модель (типа NAG), подробно описанная в [8].

Тип разрушения меди предполагался вязким, т. е. дефекты до своего объединения имеют сферическую форму. Распределение дефектов по размерам в любой момент времени представляется экспоненциальной зависимостью

$$N_m(R) = N_0 \exp(-R/R_m), \quad (1)$$

где N_0 – общее количество пор в единице объема; N_m – количество пор в единице объема с радиусом, большим R_m ; R – радиус поры; R_m – параметр распределения.

Стадия зарождения пор описывается дифференциальным уравнением для его скорости

$$\dot{N} = \dot{N}_0 \exp\left(\frac{\sigma_s - \sigma_{n0}}{\sigma_1}\right) \Theta(\sigma_s - \sigma_{n0}). \quad (2)$$

Здесь \dot{N}_0 , σ_{n0} , σ_1 – постоянные; σ_{n0} – пороговое значение напряжения, ниже которого в среде не происходит образование микропор; Θ – функция Хевисайда; σ_s – напряжение в твердом теле.

Стадия роста пор до их слияния описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{R} = \frac{\sigma_s - \sigma_{g0}}{4\eta} R \Theta(\sigma_s - \sigma_{g0}), \quad (3)$$

где σ_{g0} , η – постоянные; σ_{g0} – пороговое напряжение роста изолированной микропоры.

Константы кинетической модели для меди приведены в таблице.

На рис. 3 приведены результаты моделирования с использованием релаксационной модели сдвиговой прочности и кинетической модели откольной прочности с константами зависимости максимальной поврежденности от скорости соударения для разных типов меди (см. таблицу). Следует отметить, что при моделировании экспериментальных данных, полученных для предварительного ударно-волнового и квазиизэнтропического нагружения, учитывалось упрочнение, которое зафиксировано для образцов, подвергнутых предварительному ударно-волновому и квазиизэнтропическому нагружению (сдвиговая прочность увеличилась примерно в 5–6 раз).

Попытки смоделировать зонное распределение поврежденности меди после ударно-волнового и квазиизэнтропического нагружения с последующей разгрузкой в зазор не увенчались успехом. Возможно, причина кроется в несовершенстве модели откольного разрушения.

Константы кинетической модели для меди

Материал	σ_1 , ГПа	σ_{n0} , ГПа	σ_{g0} , ГПа	\dot{N}_0 , $\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$	η , Па·с	R_0 ($m=0$), см
Ненагруженная медь, медь после предварительного квазиизэнтропического нагружения	0,2	0,5	0,5	$2,8 \cdot 10^{12}$	20,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Медь после предварительного ударно-волнового нагружения	0,03	1,67	0,5	$2,8 \cdot 10^{12}$	90,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$

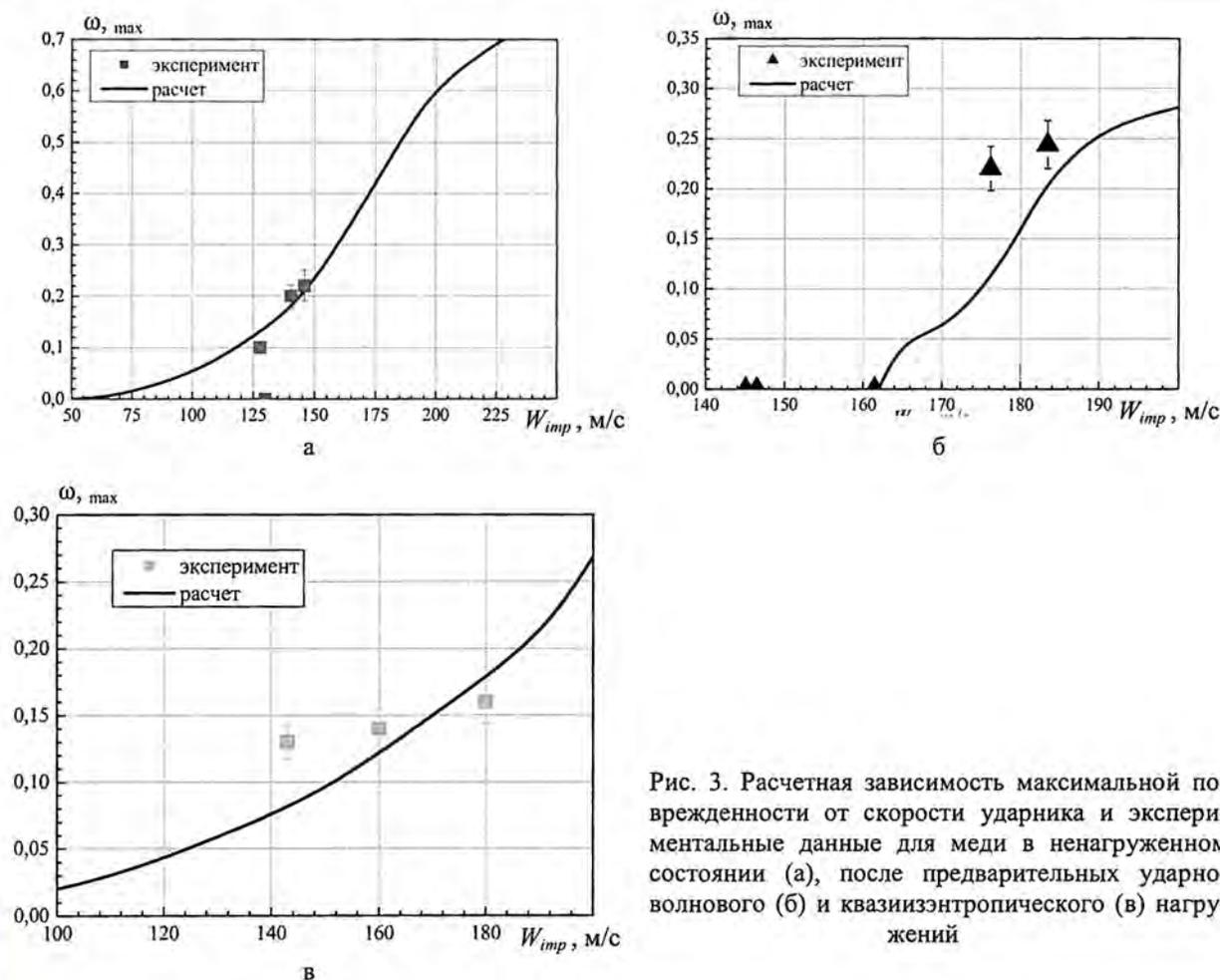


Рис. 3. Расчетная зависимость максимальной поврежденности от скорости ударника и экспериментальные данные для меди в ненагруженном состоянии (а), после предварительных ударно-волнового (б) и квазиизэнтропического (в) нагружений

Заключение

1. Предварительное нагружение меди волнами сжатия (ударной и квазиизэнтропической) приводит к значительному увеличению откольной прочности. Причем наибольшее увеличение прочности наблюдается при ударно-волновом предварительном нагружении меди, сопровождающемся появлением в зернах квазипериодических полос локализованной деформации. Для описания этого эффекта требуется значительное увеличение констант, входящих в кинетическую модель откольной прочности (пороговое напряжение роста пор увеличивается в 3–4 раза).

2. При развитии поврежденности в волне растяжения, следующей за ударной или квазиизэнтропической волной сжатия ($P = 30$ ГПа) в ряде случаев наблюдается локализация зон поврежденности размером $\sim 2\text{--}4$ мм, чередующихся с зонами, не содержащими видимых повреждений. Этот новый эффект, наблюдаемый при сравнительно малой поврежденности ($\omega \sim 0,1\text{--}0,16$), пока не имеет однозначного физического объяснения.

3. Постановка экспериментов по нагружению материалов ударной или квазиизэнтропической волной сжатия с последующей разгрузкой в зазор позволяет проследить не только зарождение поврежденности, но и процесс компактирования поврежденного материала волной сжатия.

Список литературы

1. Новиков С. А., Глушак Б. Л., Игнатова О. Н. и др. Влияние размера зерна и типа нагружения на сдвиговую и откольную прочность меди // Сб. тезисов "Shock waves in condensed matter", S.-Petersburg, Russia, 18–23 July, 2004.
2. Апрельков О. Н., Игонин В. В., Игнатова О. Н. и др. Гетерогенное деформирование меди в ударных волнах на субзеренном масштабном уровне // Сб. тезисов "Shock waves in condensed matter", S.-Petersburg, Russia, 18–23 July, 2004.
3. Chhabildas L. C., Asay J. R. Dynamic yield strength and spall strength measurement under quasi-isentropic loading. Conf. Shock Wave and High Strain Phenomena in Materials. New York. 1992. P. 947.
4. Минеев В. Н., Погорелов А. П., Иванов А. Г. и др. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках // ФГВ. 1978. № 3. С. 129–133.
5. 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.
6. Абакумов А. И., Низовцев П. Н., Певницкий А. В., Соловьев В. П. Программный комплекс ДРАКОН для расчета упругопластических течений при ударно-волновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении. IV Забабахинские чтения. Докл. межд. конференции. 1995. С. 227–228.
7. Новиков С. А., Игнатова О. Н., Раевский В. А. и др. Влияние интенсивной пластической деформации и ударно-волнового нагружения на прочность меди // VII Харитоновские чтения. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
8. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике / Под ред. А. Е. Дубинова. Арзамас-16: ВНИИЭФ. 1995. С. 59–122.

Peculiarities of Damage Nucleation Stage at Intensive Loading of Copper

Yu. V. Bat'kov, O. N. Ignatova, I. N. Kyazhkina, A. N. Malyshev,
S. S. Nadezhin, P. N. Nizovtsev, V. A. Ogorodnikov, S. A. Novikov,
A. M. Podurets, V. A. Raevsky, V. I. Skokov, I. A. Tereshkina, O. A. Tyupanova

The paper presents results of experimental studies how type of loading (shock or quasi-isentropic waves of compression) influences on nucleation and growth of damage in copper, peculiarities of damage nucleation stage at intensive dynamic loading, results of numerical simulation of processes. The simulation was performed by 1D code and 2D code with use of the relaxation model of strength and the kinetic model of spall fracture.