

07,01

## Особенности стадии зарождения поврежденности при интенсивном нагружении меди

© Ю.В. Батьков<sup>1</sup>, О.Н. Игнатова<sup>1</sup>, И.Н. Кондрохина<sup>1</sup>, А.Н. Малышев<sup>1</sup>, С.С. Надежин<sup>1</sup>, А.М. Подурец<sup>1</sup>, В.А. Раевский<sup>1</sup>, В.И. Скоков<sup>1</sup>, О.А. Тюпанова<sup>1</sup>, Marvin A. Zocher<sup>2</sup>, Dean L. Preston<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр–Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA

E-mail: root@gdd.vniief.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 30 сентября 2010 г.)

Приводятся расчетно-экспериментальные исследования процесса зарождения и развития поврежденности в отожженной крупнокристаллической меди марки М1, подвергнутой высокоскоростному нагружению до давления  $P \sim 32$  ГПа с последующим действием растягивающих напряжений  $\sigma_p$  интенсивностью  $\approx -2.0$  ГПа и временем действия  $t \approx 0.3-1.5 \mu\text{s}$ . Показано, что при определенном сочетании амплитудно-временных характеристик импульса растягивающих напряжений в ряде случаев при  $t < 1.0 \mu\text{s}$  наблюдается локализация поврежденности в зонах размером  $\sim 10-14$  мм, чередующихся с областями размером  $\sim 3-5$  мм, не содержащими видимых повреждений. Поры между собой соединены „ручейками текучести“. Существующие многостадийные модели кинетики разрушения не объясняют и не предсказывают образования „зонной“ структуры поврежденности и наличия „ручейков текучести“.

Работа выполнена при поддержке Лос Аламосской национальной лаборатории и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-02-00087а).

### 1. Введение

Современные модели откольной прочности пластичных металлов предполагают, что разрушение происходит в три стадии. На первой стадии в объеме, подвергнутом воздействию растягивающих напряжений выше критической величины ( $|\sigma_p| > |\sigma_{cr}|$ ), зарождается некоторое количество микродефектов, затем начинается их рост и на третьей стадии они сливаются, образуя магистральную трещину [1–3]. В настоящее время общепринятым считается, что зарождение микродефектов происходит в зоне действия растягивающих напряжений статистически независимо. Иными словами, вероятность зарождения поры (поврежденности) в данной точке пространства в данный момент времени определяется соотношением растягивающих напряжений и свойствами среды. Таким образом, в зоне действия одинакового импульса растягивающих напряжений должно быть равномерное по объему распределение микродефектов. Результаты большого количества экспериментов при одноосном напряженном состоянии указывают на равномерное распределение поврежденности параллельно фронту ударной волны в зоне действия растягивающих напряжений [4–6].

Однако представленные в настоящей работе эксперименты показывают, что при определенных условиях на начальной стадии воздействия растягивающего напряжения выше критического ( $\sigma_{cr}$ ) поврежденность развивается в виде скопления пор в зонах (размером  $\sim 10-14$  мм, иногда размер зоны достигает 20 мм),

разделенных „мертвыми“ областями неповрежденного вещества (размером  $\sim 3-5$  мм). Отдельные поры, как правило, соединены „ручейками“ текучести, т.е. узкими слоями вещества с измененными свойствами, что, по-видимому, обусловлено пластическим деформированием материала в этих зонах. Известные нам модели откольной прочности не объясняют такого сценария развития поврежденности.

### 2. Постановка экспериментов

В настоящей работе рассматривается медь марки М1 в исходном отожженном крупнокристаллическом состоянии (размер зерна  $\sim 110 \mu\text{m}$ ), в которой сняты внутренние напряжения и внутренние дефекты решетки распределены максимально равномерно для данной поликристаллической модификации. На рис. 1 изображена схема эксперимента в осевом сечении (медный ударник толщиной 2 мм летел со скоростью  $W = 1.6$  км/с). Радиальные размеры частей экспериментальных сборок в несколько раз превышают их толщины. Исследуемый образец диаметром 40 мм и толщиной 9 мм был запрессован в „охранное“ кольцо, которое „принимает“ на себя действие боковых разгрузок. Ударник, экран, „охранное“ кольцо (обойма) и подложка имеют диаметр 90 мм и толщины 2, 4, 9 и 10 мм соответственно. Таким образом, образец остается свободным от действия боковых волн разрежения и претерпевает действие лишь торцевой волны разрежения. Это подтверждают результаты двумерных расчетов и последующие метал-

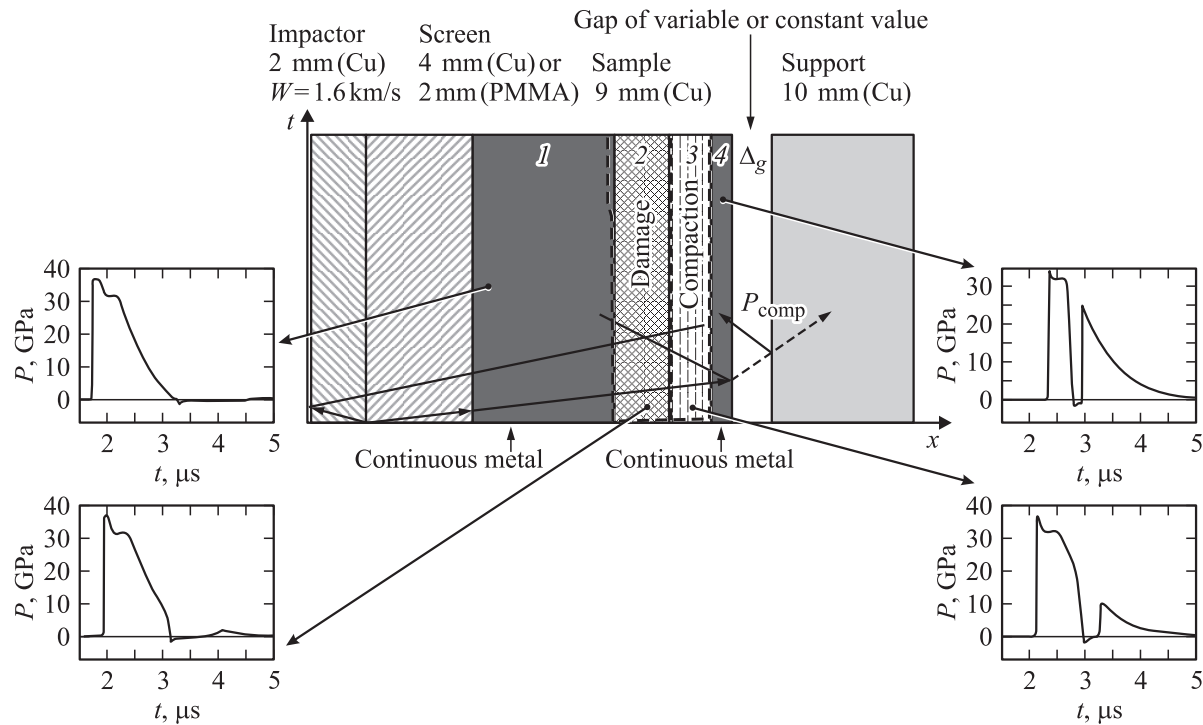


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки.

логографические исследования: поры, ручейки текучести и зоны компактирования располагаются перпендикулярно фронту ударной волны.

Растягивающие усиления возникают в материале после отражения ударной волны от его тыльной свободной поверхности и взаимодействия двух волн расширения. Исследуемые образцы и подложки из меди разделены воздушным зазором постоянной или переменной величины. Амплитуда растягивающих напряжений определяется интенсивностью нагружения, а время действия — выбором величины зазора между образцом и подложкой (рис. 2). В качестве экрана использовались либо медь М1 (ударно-волновое нагружение), либо полиметилметакрилат — ПММА (квазиизэнтропическое нагружение). В случае ударно-волнового нагружения образец подвергается действию ударной волны интенсивностью  $\sim 32$  ГПа. В случае квазиизэнтропического нагружения, которое осуществляется с помощью установки более мягкого экрана из ПММА, образец подвергается действию двух последовательных ударных волн с амплитудами  $\sim 20$  и  $\sim 12$  ГПа. В результате полное максимальное давление составляет  $\sim 32$  ГПа, время нарастания  $\sim 0.5 \mu\text{s}$ , что соответствует ударно-волновому нагружению, однако в этом случае нагружение образца является двухволновым с большей длительностью импульса растягивающих напряжений. На рис. 3 показаны зависимости напряжения от времени в образце в зоне действия максимального растягивающего напряжения при величине зазора  $300 \mu\text{m}$  в случае ударно-волнового и квазиизэнтропического (двухволнового) нагружения.

Таким образом, эксперименты поставлены так, что в медных исследуемых образцах реализуются следующие условия: а) давление в ударной волне сжатия  $P \sim 32$  ГПа и высокая скорость деформации; б) растягивающие напряжения разного времени действия.

В результате численного моделирования с использованием релаксационной модели сдвиговой прочности [7] и двухстадийной микростатической кинетической модели меди (типа NAG) [1,3] установлено, что после захлопы-

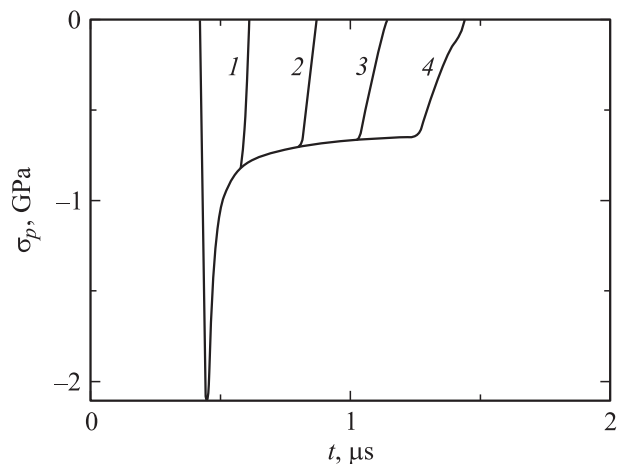
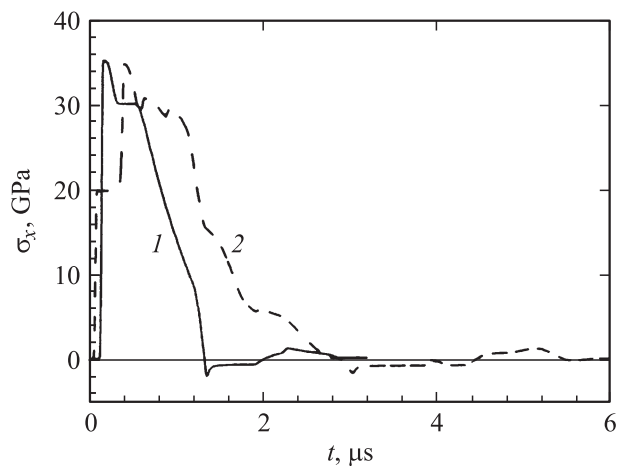


Рис. 2. Эволюция импульса растягивающих напряжений  $\sigma_p$  при ударно-волновом нагружении в зависимости от ширины зазора между образцом и подложкой.  $\Delta_g, \mu\text{m}$ : 1 — 100, 2 — 200, 3 — 300, 4 — 400.



**Рис. 3.** Зависимость напряжения от времени для ударно-волнового (1) и квазиизэнтропического (2) нагружения в зоне действия максимальных растягивающих нагрузок.

вания зазора в образец за волной разгрузки распространяется волна сжатия, затухающая по мере продвижения по поврежденному образцу и приводящая к закрытию пор в области, близкой к тыльной поверхности. В середине образца амплитуда этой волны сжатия мала и практически не влияет на развитие поврежденности. Таким образом, образец можно разделить на четыре области (рис. 1), отсчитываемые от нагружаемой поверхности: 1 — неповрежденный материал; 2 — поврежденный материал с последующим уплотнением; 3 — поврежденный материал с последующим уплотнением; 4 — неповрежденный материал — откольный слой.

В данной постановке проведено шесть экспериментов с различной вариацией зазоров и экранов.

1) Медный экран 4 mm (ударно-волновое нагружение):

а)  $\Delta_g \approx 140\text{--}320\ \mu\text{m}$  — опыты № 1 и 2 (переменный зазор);

б)  $\Delta_g \approx 250\text{--}420\ \mu\text{m}$  — опыт № 3 (переменный зазор);

с)  $\Delta_g \approx 300\ \mu\text{m}$  — опыт № 4 (постоянный зазор).

2) Экран из ПММА 2 mm (квазиизэнтропическое нагружение):

а)  $\Delta_g \approx 100\text{--}200\ \mu\text{m}$  — опыт № 5 (переменный зазор);

б)  $\Delta_g \approx 180\text{--}400\ \mu\text{m}$  — опыт № 6 (переменный зазор).

Образцы после экспериментов сохранялись и разрезались по направлению от минимального до максимального зазоров для дальнейшего микроструктурного анализа.

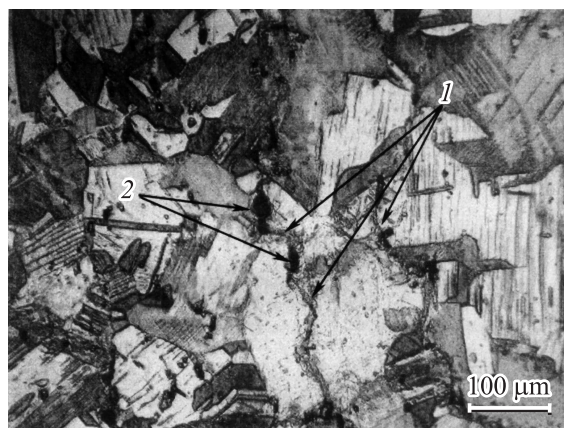
### 3. Результаты микроструктурных исследований образцов

Типичная фотография микрошлифов в зоне поврежденности показана на рис. 4, на котором видны поры и „ручейки текучести“. На фотографии микрошлифов в зоне компактирования (рис. 5) также хорошо видны полосы, которые представляют собой, по-видимому, ре-

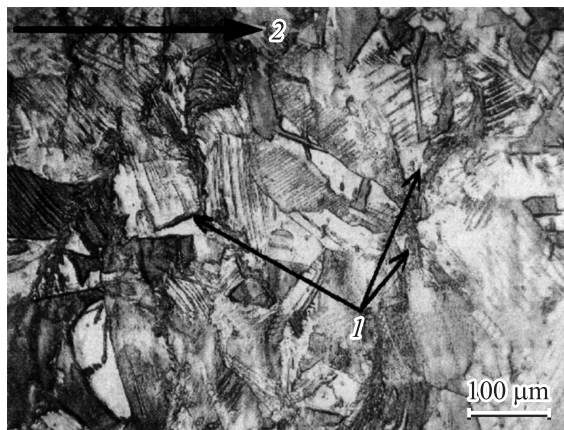
зультаты закрытия (компактирования) пор волной сжатия, следующей за волной разгрузки.

Поврежденность  $\omega$  по всем сечениям образцов определялась следующим образом: в требуемом месте шлифа устанавливалась мерная линейка длиной  $L_L = 0.8\ \text{mm}$  (увеличение в 200 раз) и измерялось отношение общей длины пор ( $L_p$ ), попавших на линейку, к ее длине:  $\frac{L_p}{L_L} \cdot 100\%$ . Это отношение в процентах и принималось за величину поврежденности.

Результаты измерения поврежденности по всей плоскости образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению до давления  $P \sim 32\ \text{GPa}$  с последующей разгрузкой в зазор постоянной ( $\Delta_g = 300\ \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p \sim -2.0\ \text{GPa}$ ,  $t \sim 0.6\text{--}0.7\ \mu\text{s}$ ) и переменной ( $\Delta_g = 140\text{--}320\ \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p \sim -2.0\ \text{GPa}$ ,  $t \sim 0.3\text{--}0.7\ \mu\text{s}$ ) величины, представлены на трехмерных диаграммах (рис. 6, 7). Как видно из рисунков, поврежденность носит немонокотный по

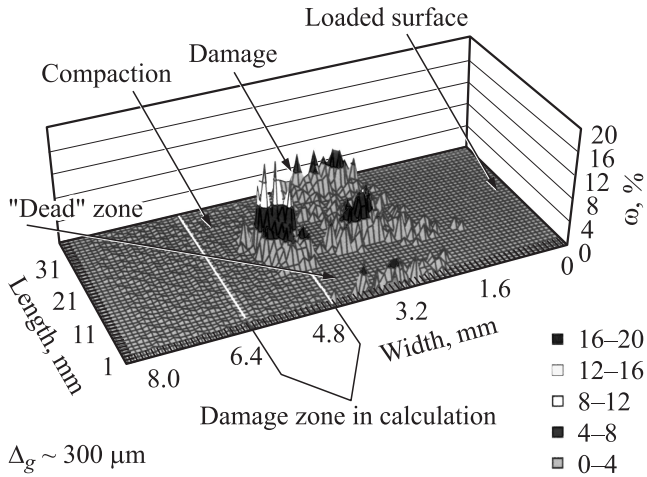


**Рис. 4.** Фотография микроструктуры образца в зоне поврежденности на глубине 5 mm от нагружаемой поверхности (нагружение  $P \sim 32\ \text{GPa}$  слева,  $\Delta_g = 300\ \mu\text{m}$ , опыт № 4): 1 — „ручейки“, 2 — поры.

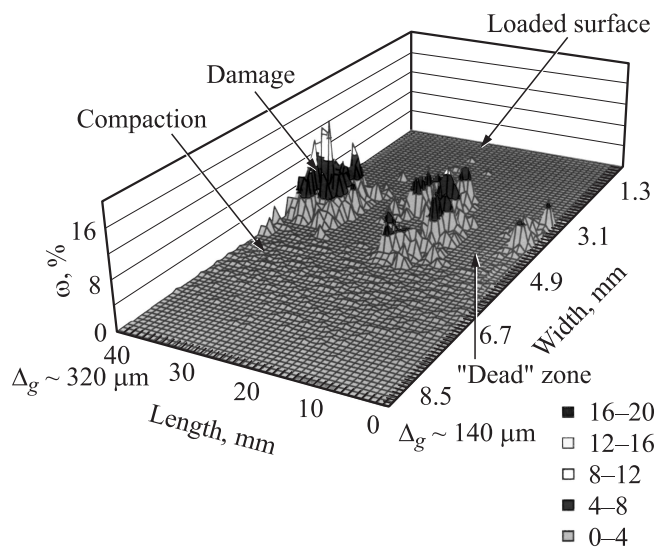


**Рис. 5.** Фотография микроструктуры образца в зоне компактирования (нагружение  $P \sim 32\ \text{GPa}$  слева,  $\Delta_g = 300\ \mu\text{m}$ , опыт № 4): 1 — следы компактирования, 2 — направление нагружения.

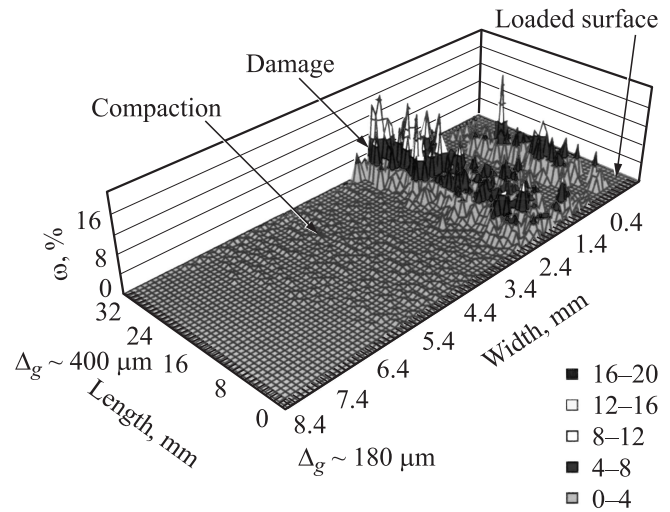
диаметру образца характер: в образцах чередуются области заметной поврежденности ( $\omega \sim 7-15\%$ ) и области  $\sim 3-5$  mm, вообще не содержащие следов нарушения сплошности ( $\omega = 0$ ), так называемые „мертвые“ области. Таким образом, поврежденность локализуется в отдельных зонах. Микропоры соединены между собой ручейками деформированного вещества („ручейки текучести“, рис. 4). Аналогичная ситуация прослеживается и в других образцах, подвергнутых как ударно-волновому, так и квазиизотропическому нагружению при реализации уровня поврежденности  $\omega \sim 7-15\%$ .



**Рис. 6.** Распределение поврежденности по плоскости образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению  $P \sim 32$  GPa с последующей разгрузкой в зазор постоянной величины  $\Delta_g = 300 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p \sim -2.0$  GPa,  $t \sim 0.6-0.7 \mu\text{s}$  (опыт № 4). Тоновая шкала относится к величине поврежденности  $\omega$ .



**Рис. 7.** Распределение поврежденности по плоскости образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению  $P \sim 32$  GPa с последующей разгрузкой в переменный зазор  $\Delta_g = 140-320 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p \sim -2.0$  GPa,  $t \sim 0.3-0.7 \mu\text{s}$  (опыт № 1). Тоновая шкала относится к величине поврежденности  $\omega$ .



**Рис. 8.** Распределение поврежденности по плоскости образца, подвергнутого квазиизотропическому нагружению  $P \sim 32$  GPa с последующей разгрузкой в зазор переменной величины  $\Delta_g = 180-400 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p \sim -2.0$  GPa,  $t \sim 1.4-1.7 \mu\text{s}$  (опыт № 6). Тоновая шкала относится к величине поврежденности  $\omega$ .

Характерно, что, согласно проведенным двумерным расчетам, максимальная интенсивность растягивающих напряжений в неповрежденных зонах, находящихся между скоплениями пор, достигает величины  $\sigma_p \sim -15.0$  GPa, т.е. на порядок больших критических напряжений возникновения повреждений, используемых в расчетах ( $\sigma_{cr} \sim -0.5$  GPa) [3]. При увеличении времени действия растягивающих напряжений до  $t > 1 \mu\text{s}$ , как, например, в опыте № 6, распределение поврежденности носит обычный монотонный характер и ее величина растет с увеличением зазора (рис. 8).

Таким образом, сценарий развития поврежденности отличается от общепринятого трехстадийного микростатического подхода [1-3] тем, что микродефекты не зарождаются независимо друг от друга. В качестве гипотезы можно предложить следующий сценарий. В первый момент времени действия растягивающих напряжений случайным образом появляется отдельный „очаг“, или микропора, которая является центром зоны поврежденности. За время действия растягивающих напряжений  $t$  со скоростью звука  $C_0$  от „очага“ во все стороны распространяются ручейки текучести (полосы локализованного сдвига, рис. 4) на расстоянии  $L = tC_0$ , которые в свою очередь являются источниками зарождения новых микропор. В данном случае, например, для  $\Delta_g = 300 \mu\text{m}$ ,  $t \approx (0.6-1.0) \cdot 10^{-6}$  s,  $C_0 \approx 4.0 \cdot 10^6$  mm/s; следовательно, ручейки текучести от центра распространяются на расстояние  $L \approx 5-8$  mm, которые близко к полученным экспериментально размерам областей скопления поврежденности  $L_{exp} \approx 10-14$  mm (рис. 6). Таких центров в образце может быть несколько и, если время действия растягивающих напряжений большое ( $t > 1 \mu\text{s}$ ), области от отдельных центров сливаются



в одну полосу, и распределение поврежденности носит достаточно монотонный характер (рис. 8).

Попытки смоделировать зонное распределение поврежденности меди после ударно-волнового и квазиизэнтропического нагружения с последующей разгрузкой в зазор пока не увенчались успехом.

#### 4. Заключение

При определенном сочетании амплитудно-временных характеристик импульса растягивающих напряжений (интенсивность  $\approx -2.0$  ГПа и время действия  $t \approx 0.3-1.5 \mu\text{s}$ ) в ряде случаев наблюдается локализация поврежденности в зонах размером  $\sim 10-14$  мм, чередующихся с „мертвыми“ областями  $\sim 3-5$  мм, не содержащими видимых повреждений. Этот эффект, наблюдаемый при сравнительно малой поврежденности ( $\omega \sim 10-15\%$ ), пока не имеет однозначного физического объяснения. При увеличении времени действия растягивающих напряжений распределение поврежденности носит обычный монотонный характер.

#### Список литературы

- [1] T. Barbee, L. Seaman, R. Crewdson, D. Curran. *J. Matter.* **7**, 3, 393 (1972).
- [2] А.И. Рузанов. *Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела* **5**, 59 (1984).
- [3] Б.Л. Блашак, И.Р. Трунин, С.А. Новиков, А.И. Рузанов. Численное моделирование откольного разрушения металлов. Фракталы в прикладной физике / Под ред. А.Е. Дубинова. ВНИИЭФ. Арзамас-16 (1995). С. 59.
- [4] I. Seaman, D.R. Curren, D.A. Shockey. *J. Appl. Phys.* **47**, 11, 4814 (1976).
- [5] R.S. Nixson, G.T. Gray, P.A. Rigg. *Dynamic damage investigation using triangular waves. SCCV* (2003). P. 469.
- [6] В.К. Голубев, С.А. Новиков. *Проблемы прочности* **1**, 89 (1987).
- [7] А.И. Лебедев, В.В. Игонин, П.Н. Низовцев, В.А. Раевский, В.П. Соловьев. Исследование неустойчивости свободной поверхности твердых тел при ударно-волновом воздействии. *Тр. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров* (2001). В. 1. С. 590.