



УДК 538.951, 548.4

О СТАТИСТИКЕ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ БОЛЬШЕУГЛОВЫМИ ГРАНИЦАМИ В АРМКО-ЖЕЛЕЗЕ, ПОДВЕРГНУТОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ

Е.А. Ляпунова, С.В. Уваров, О.Б. Неймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013, Россия, e-mail: lyapunova@icmm.ru

Аннотация. Работа посвящена изучению процессов структурной релаксации и разрушения мишеней из армко-железа при ударно-волновом нагружении с учетом коллективных эффектов в ансамблях мезодефектов. Изложены результаты количественного анализа оптических микрофотографий, позволившего установить смену статистики интервалов между большеугловыми границами: от нормального закона для недеформированного материала к распределению Вейбулла для материала, подвергнутого ударно-волновому воздействию. Прослежена эволюция параметров распределения Вейбулла в материале по мере приближения к области откола. Обнаруженный рост параметра формы в распределении Вейбулла для пространственных интервалов между большеугловыми границами может быть связан с ростом параметра обострения в области откола в моделях поведения металлов при высокоскоростном воздействии.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, откол, количественная металлография.

Известно, что процессы деформирования и разрушения металлов и сплавов в условиях ударно-волнового нагружения сопровождаются зарождением, ростом и взаимодействием разномасштабных дефектов. Закономерности высокоскоростного деформирования металлов и сплавов являются предметом интенсивных исследований ведущих научных коллективов на протяжении последних десятилетий. Предпринимаются попытки установить связь между ключевыми структурными параметрами мишени, условиями нагружения и механическими свойствами материала [1, 2]. Показана существенная роль межзеренных границ, являющихся источником дефектов (микротрещин и микропор), в формировании прочностных свойств металлических мишеней [2]. Установлено, что высокоскоростное деформирование приводит к появлению значительных (но сравнению с квазистатическим деформированием) разориентировок в структуре [3], накопление которых обуславливает формирование новых большеугловых границ в материале и предшествует развитию очагов разрушения. В настоящей работе на основе количественного анализа данных микроскопии мишеней из армко-железа, подвергнутых ударно-волновому нагружению, исследуются статистические закономерности формирования большеугловых границ по мере приближения к области откола.

Особенности эксперимента, результаты микроструктурного анализа и фрактографии изложены в [4]. Согласно проведенным ранее исследованиям, а также работам других авторов [5], основными каналами структурной релаксации в мишенях из армко-железа в реализованном диапазоне скоростей нагружения являются двойникование, фрагментация исходных зерен за



счет накопления разориентировок на субзеренных (малоугловых) границах, образование, рост и слияние микротрещин и микропор на завершающей стадии процесса разрушения. Эти процессы приводят к появлению новых границ со значительной разориентировкой (большеугловых границ), плотность которых связана с интенсивностью деформационных процессов, а также с ориентировкой кристаллитов (рис. 1). При этом в зависимости от типа большеугловых границ величина интервалов между ними есть размер зерна (для недеформированного материала), субзерна (если в деформированном материале имеет место фрагментация), размер двойника или окружающей его матрицы. Большеугловые границы могут быть выявлены различными способами, например, химическим или ионным травлением полированных металлографических шлифов, а микрофотографии структуры могут быть использованы для определения количественных характеристик материала. Общепринятыми параметрами количественной металлографии являются средний размер зерна, плотность дислокаций и двойников [6], однако закон распределения этих параметров несет самостоятельную информацию о процессах деформирования и разрушения.

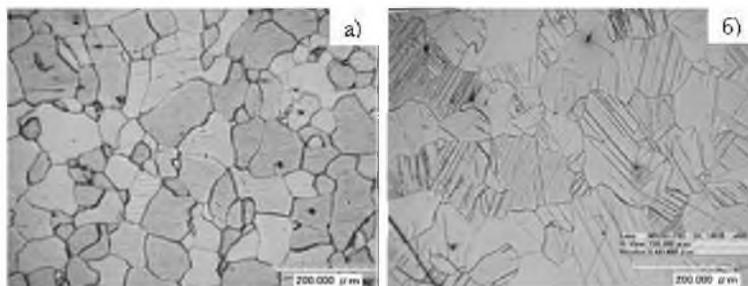


Рис. 1. Фрагменты микрофотографий, используемых для количественного анализа: а) недеформированный материал, б) мишень, подвергнутая ударно-волновому нагружению.

Для исследования данного вопроса из сохранных мишеней изготавливались шлифы, параллельные поверхности откола; выявление микроструктуры осуществлялось с помощью стандартных методов (механическая полировка и последующая электрохимическая полировка и травление). Металлографические шлифы сканировались с помощью цифрового оптического микроскопа Nirox 7700. Полученные последовательной съемкой микрофотографии (размер каждой микрофотографии составлял 1200x1600 пикселей, величина одного пикселя 0.45 мкм) собирались в панораму, размер которой варьировался в пределах 1200x24000x...x1200x30000 пикселей. В результате применения последовательности стандартных функций для обработки изображений в Matlab панорамные микрофотографии структуры приводились к черно-белому виду с утонченными большеугловыми границами, и извлекалась информация о координатах пикселей, соответствующих большеугловым границам, используемая для составления вектора значений пространственных интервалов между ними. Использование расширенного режима съемки микрофотографий позволило получить достаточно представительную выборку для анализа: от 11 до 45 тысяч значений интервалов между большеугловыми границами для каждого сечения мишени. Поскольку в реализуемой схеме нагружения в каждом сечении мишени, параллельном поверхности откола, материал находится в одинаковом деформированном состоянии, выбор направления, в котором производится регистрация интервалов между большеугловыми границами в таком сечении, не влияет на результаты статистики интервалов; однако в общем случае данный метод может использоваться для определения анизотропии структуры материала.

Наиболее наглядный метод, позволяющий установить, удовлетворяют ли экспериментальные данные тому или иному закону распределения, заключается в построении совместного графика отсортированных по возрастанию экспериментальных данных и кумулятивной функции исследуемого распределения. В зависимости от проверяемого закона распределения построение графика производится в логарифмических или полу-логарифмических координатах, чтобы получить линейную зависимость. Если экспериментальные данные ложатся на прямую линию, то сделанное предположение о законе распределения корректно. Метод применяется для исследования сигналов различной природы: распределения частиц по размерам, усталостной или динамической выносливости материалов и конструкций и др. [7, 8].

Использование описанного выше метода для анализа металлографических шлифов недеформированного материала, а также шлифов, изготовленных из сохранных мишеней, позволило экспериментально показать смену закона распределения интервалов между большеугловыми границами. Так, в недеформированном материале распределение интервалов между большеугловыми границами подчиняется нормальному закону (рис. 2,а), тогда как для материала, подвергнутого высокоскоростному нагружению, статистика интервалов удовлетворяет распределению Вейбулла с показателем формы $b > 1$ (рис. 2,б).

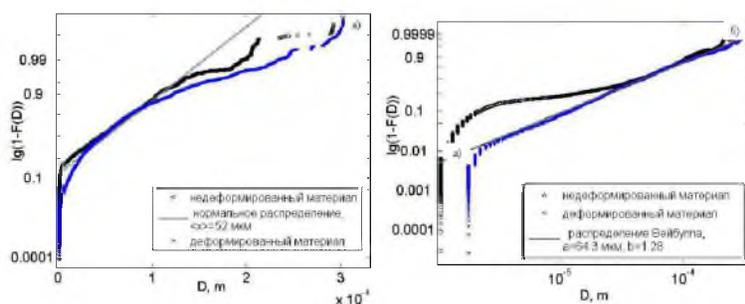


Рис. 2. К определению статистики интервалов между большеугловыми границами в недеформированном и деформированном материале: а) проверка применимости нормального закона распределения, б) проверка применимости распределения Вейбулла. $F(D)$ — кумулятивная функция распределения экспериментальных данных.

Рис. 3,а иллюстрирует изменение графика кумулятивной функции распределения интервалов между большеугловыми границами $F(D)$ от величины интервалов по мере приближения к откольной поверхности для мишени, подвергнутой ударно-волновому нагружению (скорость ударника 320 м/с). Для интервалов между большеугловыми границами D , меньшими 40 мкм, наклон графиков функций $F(D)$, определяющий значение параметра формы b , увеличивается по мере приближения к области откола, тогда как для интервалов $D > 40$ мкм, наклон остается практически постоянным (рис. 3,а). Это отражает процессы формирования новых большеугловых границ, приводящих к фрагментации исходных зерен. Причиной увеличения параметров распределения Вейбулла для интервалов между большеугловыми границами по мере приближения к откольной поверхности (рис. 3,б) может являться обостренный характер развития разрушения в материале при высокоскоростном воздействии.

В статистике Вейбулла, обычно применяемой для временных интервалов между единичными событиями разрушения, параметр формы b определяет скорость разрушения, при этом значения $b > 1$ соответствуют режиму возрастания скорости разрушения, т.н. режиму «старения» [8]. Это означает, что в материале происходит рост новых дефектов, в дальнейшем



служащих очагами разрушения. В соответствие с этим, параметр b для пространственных интервалов между большеугловыми границами есть количественная мера интенсивности структурных изменений при переходе к откольному разрушению, которая может быть использована для верификации структурного параметра модели деформационного поведения металлов [9].

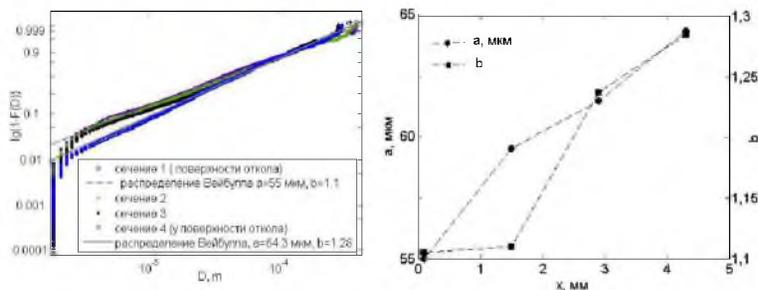


Рис. 3. Изменение параметров распределения Вейбулла для мишени, подвергнутой ударно-волновому нагружению при скорости ударника 320 м/с, для различных по толщине сечений мишени: а) графики функции $F(D)$, б) сводный график изменения параметров распределения Вейбулла и b в зависимости от расстояния от поверхности соударения x .

Вопрос о чувствительности параметров распределения Вейбулла для интервалов между большеугловыми границами к скорости нагружения является следующим этапом исследований.

Литература

1. Murr L.E. Metallurgical effects of shock and high-strain-rate loading. Materials at high strain rates / Elsevier applied science publishers LTD, 1987.
2. Minich R.W., Kumar M., Schwarz A., Cazamias J. Scaling, Microstructure and Dynamic fracture // AIP Conf. Proc. – 2005. – P.642.
3. G.T. (Rusty) Gray III. High-strain-rate deformation: mechanical behavior and deformation substructures induced // Annu. Rev. Mater. Res. – 2012. – 42. – P.285–303.
4. Ляпунова Е.А., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Анализ структурных изменений, обусловленных ударно-волновым нагружением металлических мишеней (ванадий, армо-железо) // Вестник Пермского университета. – 2012. – №4(22). – С.135-138.
5. Козлов Е.А., Теличко И.В., Горбачев Д.М., Панкратов Д.Г., Добромыслов А.В., Талуц Н.И. К вопросу о метастабильности, неполноте протекания α - β -фазового превращения в нелегированном железе при пороговых импульсах нагрузки. Особенности деформационного поведения и структуры армо-железа // Физика металлов и металловедение. – 2005. – №99. – С.83-97.
6. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография / М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
7. Chambers J., Cleveland W., Kleiner B., Tukey P. Graphical Methods for Data Analysis / Belmont, CA: Wadsworth International Group, 1983.
8. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // ASME Journal of applied mechanics. – 1951. – September. – P.293-297.
9. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – 6; №4. – С.45-72.



**ON STATISTICS OF INTERVALS BETWEEN HIGH-ANGLE BOUNDARIES
IN ARMKO-IRON SUBJECTED TO SHOCK-WAVE LOADING**

E.A. Lyapunova, S.V. Uvarov, O.B. Naimark

Institute of continuous media mechanics,
Akademic Korolev St., 1, 614013, Perm, Russia, e-mail: lyapunova@icmm.ru

Abstract. Regularities of structural relaxation and fracture of armko-iron targets occurring during shock-wave loading are under study. Results of quantitative analysis of optical microscopy of metallographical sections, which revealed the change in statistics of intervals between high-angle boundaries are reported. It was shown that for none-deformed material intervals between high-angle boundaries obeyed normal distribution whereas for material after shock-wave loading they follow Weibull distribution. Evolution of Weibull distribution parameters in direction to the fracture (spall) surface is also presented.

Key words: shock-wave loading, spall fracture, quantitative metallography.