

05.1

Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061

© *Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, О.Б. Наймарк,
М.А. Сокоиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров*

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: lyapunova@icmm.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2011 г.

Механизмы локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении, сопровождающемся формированием „пробки“, связываются со структурными переходами в ансамбле дефектов. Характерным признаком данных переходов является многомасштабность формирующихся структур. Обнаружено существование двух зон с признаками масштабной инвариантности: зоны локализации пластической деформации и локализации разрушения. Показано, что протяженность данных зон зависит от скорости соударения. Глубина деформированного слоя, в котором происходит локализация деформации, имеет выраженную тенденцию к росту в направлении к свободной поверхности мишени. Переход от зоны локализации пластической деформации к зоне разрушения характеризуется резким увеличением показателя Херста.

Неустойчивость и локализация пластической деформации при динамическом нагружении связывается с коллективными эффектами в ансамблях микросдвигов в условиях структурно-скейлинговых переходов [1], следствием которых является формирование ориентационно-выраженных многомасштабных дислокационных структур [2]. Данная работа направлена на изучение свойств дефектной подсистемы в условиях реализации значительных сдвиговых деформаций в узком слое материала. Многомасштабность образующихся дефектных структур позволяет использовать концепцию фрактальности для их количественного описания.

Динамическое нагружение и разрушение цилиндрических образцов-мишеней из сплава А6061 по механизму формирования и выноса пробки осуществлялось стальным стержнем с плоской торцевой частью [3]. Продольные сечения деформированных образцов подвергались механической и электрохимической полировке, выявившей линии течения материала, концентрация которых оказалось наибольшей в области иницирования сдвига, что говорит об интенсивности протекающих здесь деформационных процессов.

По мере проникания ударника в образец происходит расширение деформированной зоны, и все больший объем материала оказывается вовлеченным в процесс выноса пробки. Расширение деформированного слоя по мере продвижения в зоне локализации пластической деформации было установлено по данным измерения микротвердости, а также по смещению линий текстуры и восстановленных по ним абсолютных величин сдвиговых деформаций. Ширина упрочненного слоя материала вблизи поверхности разрушения, соответствующего зоне локализации пластического течения, увеличивается при продвижении вдоль канала от значений $\sim 500 \mu\text{m}$ вблизи поверхности разрушения до $\sim 1000 \mu\text{m}$ в области, соответствующей финальному разрушению.

Наблюдаемые линии деформации обусловлены направлениями преимущественного течения материала при внедрении ударника и выявляются также макротравлением отполированных шлифов (рис. 1, *a*). Ширина этих макрополос деформации составляет $10\text{--}20 \mu\text{m}$. Травление раствором едкого натра выявляет их тонкую структуру: каждая такая макрополоса состоит из $15\text{--}20$ более тонких микрополос (рис. 1, *b*).

Повышенная твердость, а также характер расположения линий деформации, их концентрация вблизи канала и относительно небольшая ширина сильнодеформированного слоя позволяют сделать вывод об интенсивности деформационных процессов, протекающих в этой области. Для идентификации механизмов деформации на уровне отдельных фрагментов структуры было проведено исследование тонких фольг из сильнодеформированного слоя на электронном просвечивающем микроскопе „JEM-200СХ“. Установлено, что в недеформированной структуре субзерна размером $1.5\text{--}2 \mu\text{m}$ разделены малоугловыми границами. При внедрении ударника в материал в узком слое происходят вытягивание субзерен в полосы и их фрагментация, а также измельчение исходной крупнокристаллической структуры вплоть до ультрамикроскопической с размером зерна $\sim 300 \text{nm}$. Микрофрагменты такой структуры — кольцевого типа с большим количеством

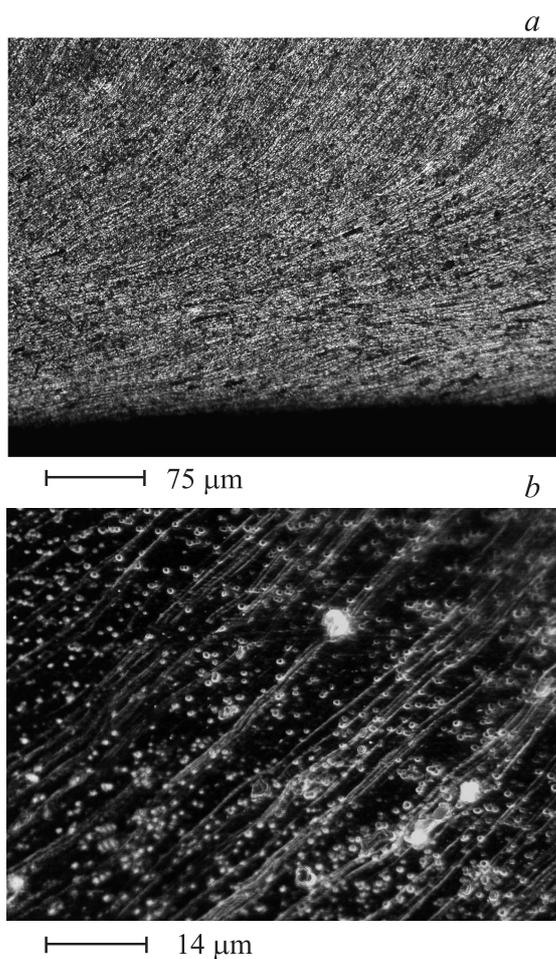


Рис. 1. Структура деформированного образца вблизи поверхности разрушения в области образования пробки на различных уровнях: *a* — на уровне макрополос деформации, электрополировка и травление в 10%-ном водном растворе HF, оптическая микроскопия; *b* — на уровне более тонких микрополос, травление 1%-ным раствором NaOH (70°C), оптическая микроскопия, съемка в темном поле.

точечных рефлексов — свидетельствуют о возникновении высокоугловых разориентировок зерен. Таким образом, можно заключить, что наряду с формированием малоугловых границ внутри исходных субзерен, осуществляющимся при выстраивании решеточных дислокаций, происходит возникновение высокоугловых границ за счет ротационных мод деформации.

На поверхности разрушения всех образцов наблюдаются две характерные зоны: зеркальная область, возникающая вследствие трения боковой поверхности ударника о материал образца, и шероховатая, соответствующая формированию и выносу пробки. Переход от зеркальной поверхности к шероховатой происходит ступенчато. Зона первоначального внедрения ударника соответствует „затирацию“ рельефа вдоль поверхности образующегося канала. Структура шероховатой зоны, следующей за зоной выраженного трения, не является однородной и отражает процессы эволюции дефектной структуры материала при динамическом нагружении.

В случае внедрения в образец ударника, скорость которого значительно превышает баллистический предел (124 m/s), на поверхности разрушения, следующей за зеркальной поверхностью, имеются две характерные области. Первая, с мелкомасштабной шероховатостью, отвечает начальному этапу распространения области локализации пластической деформации, тогда как вторая, с присутствующими на ней крупномасштабными морфологическими структурами, соответствует квазихрупкому разрушению. Для исследования закономерностей формирования рельефа поверхность разрушения сканировалась на микроскопе „New View 5010“, в результате чего были получены данные о рельефе от начала шероховатой зоны до тыльной поверхности образца (рис. 2, *a*). В каждой из отсканированных областей были восстановлены средние профили в направлении вдоль движения ударника (6 профилей для каждой области, осредненные по 80 линиям). Для каждого среднего профиля вычислялись показатели Херста тремя методами (метод осредненного размаха, метод q -Hurst по наклону спектра мощности [4,5]). В результате были получены значения показателя Херста на 6 соседних профилях, что позволяет оценивать неоднородность данной величины по пространству. Все примененные методы показали непротиворечащие друг другу результаты, поэтому далее приводятся графики для метода среднего размаха. При анализе одномерного профиля по данному методу исследуемый профиль разбивался на отрезки размером R , и

строилась зависимость функции среднего размаха высот от размера рассматриваемого отрезка:

$$K(R) = \left\langle \max_{r' \in w_i} (z(r')) - \min_{r' \in w_i} (z(r')) \right\rangle_{w_i} \propto R^H,$$

где $z(r')$ — вектор значений высот на текущем отрезке длины w_i , усреднение $\langle \dots \rangle_{w_i}$ производилось по всем отрезкам. Линейный участок на графике $K(R)$, построенном в логарифмических координатах, свидетельствует о масштабной инвариантности преобразования рельефа на некотором интервале масштабов. Этот интервал и величина наклона линейного участка (показатель Херста) характеризуют закон преобразования рельефа. По величине показателя Херста можно судить о шероховатости рельефа: более шероховатой поверхности соответствует меньшее значение показателя Херста и наоборот [4,5]. Данный метод широко применяется при анализе поверхностей изломов [5], статистики фрагментации и др.

Было обнаружено локальное понижение показателя Херста на поверхности разрушения вблизи начала формирования шероховатой зоны (рис. 3, *a*). Здесь параметр Херста примерно постоянен и лежит в пределах 0.3–0.4 на спектре масштабов от 1 до 18 μm . Визуально шероховатая область выглядит более матовой. При переходе ко второй области на поверхности разрушения наблюдается увеличение параметра Херста: в этой области он изменяется в пределах от 0.5 до 0.6, что отражает более коррелированное поведение на тех же масштабах. Примерное постоянство значения показателя Херста в каждой из наблюдаемых областей отражает наличие характерного механизма структурной релаксации, отвечающего за процесс динамической локализации пластической деформации.

На поверхности разрушения образца, пробитого при скорости ударника, в 2.5 раза превышающей баллистический предел (260 m/s), протяженность зеркальной зоны больше, а матовая шероховатая область, наблюдаемая при низких скоростях соударения, отсутствует (рис. 2, *b*). Это подтверждается и вычислениями показателя Херста по методике, аналогичной анализу данных для первого образца: показатель Херста оказался в пределах 0.5–0.6 (рис. 3, *b*). Полученные значения показателя Херста на поверхности разрушения образца, пробитого при скорости 260 m/s, численно совпадают со значениями для второй области на поверхности образца, пробитого при 124 m/s.

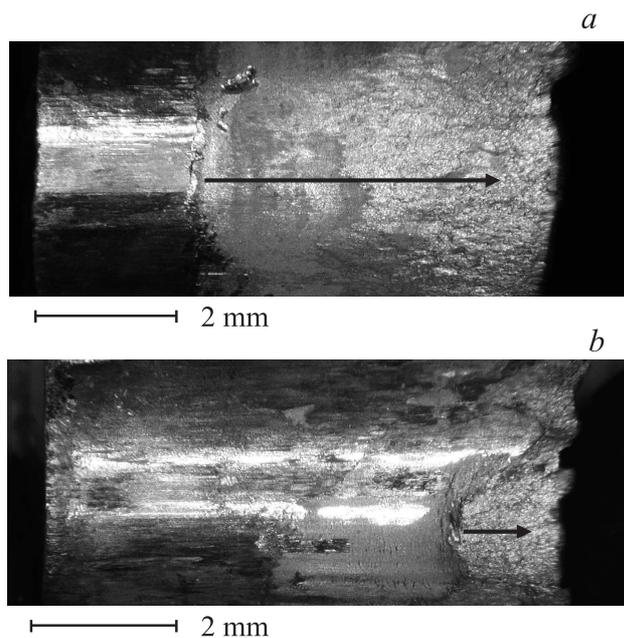


Рис. 2. Поверхности разрушения образцов, пробитых при скорости ударника 124 м/с (*a*) и 260 м/с (*b*), направление движения ударника — слева направо; стрелкой показаны направление и область исследования на предмет изменения показателя Херста.

Таким образом, методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлены закономерности развития зон локализации пластической деформации и локализации разрушения, формирующихся при динамическом нагружении образцов из сплава А6061 по механизму формирования пробки. Показано, что характерная ширина данных зон возрастает в направлении к свободной поверхности; при этом дефектная структура материала обнаруживает признаки масштабной линии течения на макро- и микроуровне.

На поверхности разрушения наблюдаются две области различной морфологии (мелко- и крупномасштабной шероховатости), которые связаны с процессом локализации пластической деформации и локализации

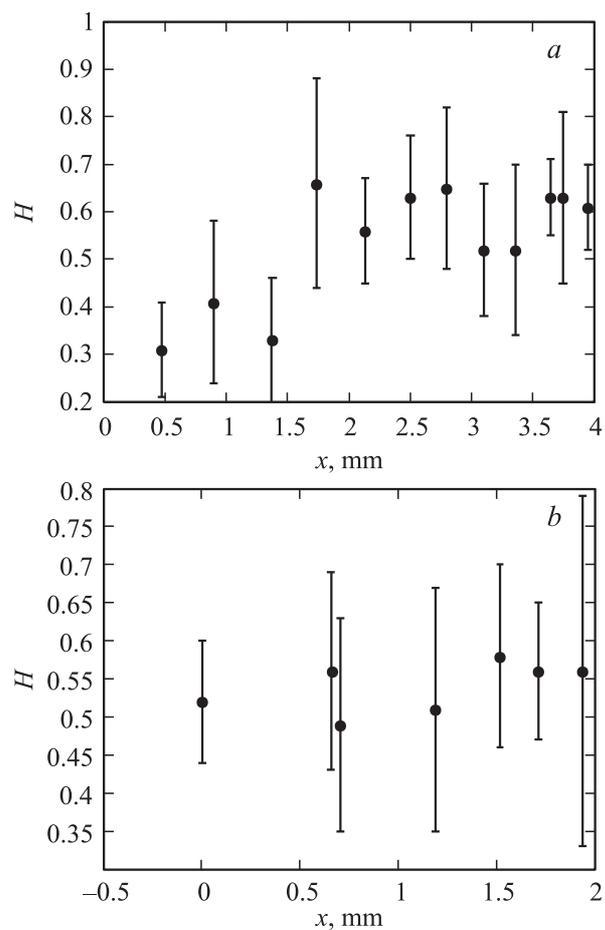


Рис. 3. График изменения показателя Херста на шероховатой поверхности разрушения от ее начала (переход от зеркальной области) к развитому разрушению (у тыльной поверхности образца) для скоростей ударника 124 м/с (*a*) и 260 м/с (*b*).

разрушения. Переход к последней характеризуется резким увеличением показателя Херста, что связывается с качественными изменениями механизма формирования дефектных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты РФФИ № 09-01-92005-ННС_а, 11-01-00712-а, 11-01-96010-р_урал_а).

Список литературы

- [1] *Наймарк О.Б.* // Физическая мезомеханика. 2004. № 6. С. 45–72.
- [2] *Nesterenko V.F., Meyers M.A., Wright T.W.* Collective behavior of shear bands // Metallurgical and materials applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. V. 47. P. 397–404.
- [3] *Ляпунова Е.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б.* // Вестник ПГТУ. 2010. № 2. С. 79–86.
- [4] *Schmittbuhl J., Vilotte J.-P.* // Phys. Rev. E. 1995. V. 51. N 1.
- [5] *Bouchaud E.* // J. Phys.: Condens. Matter. 1997. N 9. P. 4319–4344.