

05

Формирование многомасштабной структуры при ударном нагружении твердого тела

© Ю.И. Мещеряков¹, Н.И. Жигачева¹, Г.В. Коновалов¹, А.К. Диваков¹, В.А. Морозов²¹ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: um38@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2020 г.

Принято к публикации 16 декабря 2020 г.

С целью изучения процессов многомасштабного структурообразования вдали от термодинамического равновесия проведена серия экспериментов по ударному нагружению мишеней из алюминиевых сплавов импульсами наносекундной длительности, инициируемыми метательной установкой и импульсным электронным пучком. В обоих случаях в приконтактной области ударного нагружения выявлены крупномасштабные структуры мезоскопического уровня, размеры которых с увеличением толщины мишеней уменьшаются, в то время как материал мишени становится однородным. Переход к однородной структуре в алюминии 1565 происходит при толщине мишени 2.2 мм, одновременно изменяется макроскопический отклик (откольная прочность) материала на ударное нагружение.

Ключевые слова: ударное нагружение, многомасштабная структура.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50790.18633

Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, определяющими факторами структурообразования в твердом теле оказываются не только вещество и его состояние, но и скорость ввода импульса нагрузки и интенсивность энергообмена между масштабными уровнями [1–4]. На макроскопическом уровне смена механизма и масштабного уровня динамического деформирования проявляется в изменении характера отклика материала на ударное нагружение. На микроуровне смена масштабного уровня определяется по структурным изменениям материала. В соответствии с современной теорией транспортных процессов в конденсированных средах в начальные моменты времени динамического нагружения формируются крупномасштабные структуры, отвечающие за процессы волнового переноса энергии, и только после того, как устанавливается равновесие, инициируются диффузионные процессы [5,6]. В алюминии и его сплавах, согласно данным по затуханию упругого предвестника, равновесное состояние устанавливается в течение 200–300 нс, что соответствует 1–2 мм [7].

В настоящей работе в порядке дальнейшего изучения процессов динамического структурообразования проведены эксперименты по импульсному нагружению мишеней из алюминиевых сплавов Д16 и 1565. В качестве контролирующего параметра интенсивности энергообмена между масштабными уровнями динамического деформирования и смены механизма структурообразования принят так называемый „дефект“ массовой скорости, который определяется разностью между скоростью ударника при симметричном соударении ($\rho_{imp}C_{imp} = \rho_t C_t$) и

максимальным значением скорости свободной поверхности ($\delta U_{def} = U_{imp} - U_{max}^{fs}$) [6].

Ударные испытания материалов проводились в двух режимах. В первом режиме осуществлялось нагружение в условиях одноосной деформации плоских мишеней разной толщины, для этого использовалась легкогазовая ударная установка. Скорость ударника из алюминиевого сплава Д16 во всех опытах была примерно одинаковой и равной 405 ± 5 м/с. Для регистрации отклика мишени на ударное нагружение использовался скоростной интерферометр [8]. На рис. 1 представлены кривые зависимости откольной прочности W , размера структурных элементов L и дефекта скорости δU_{def} от толщины мишени. Видно, что при толщине мишени 2.2 мм ход

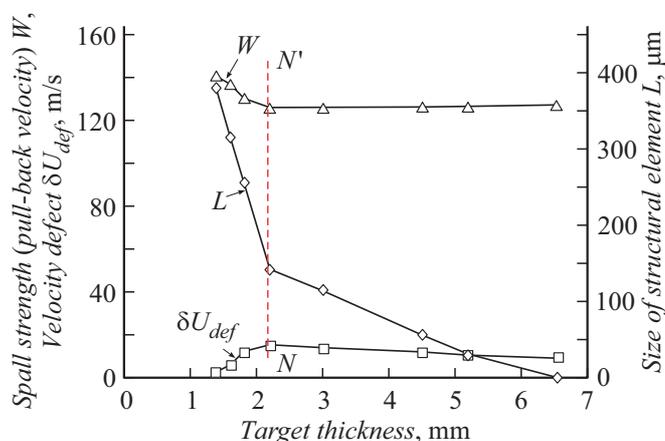


Рис. 1. Зависимости откольной прочности W , дефекта скорости δU_{def} и размера структурного элемента L от толщины мишени для алюминиевого сплава 1565.

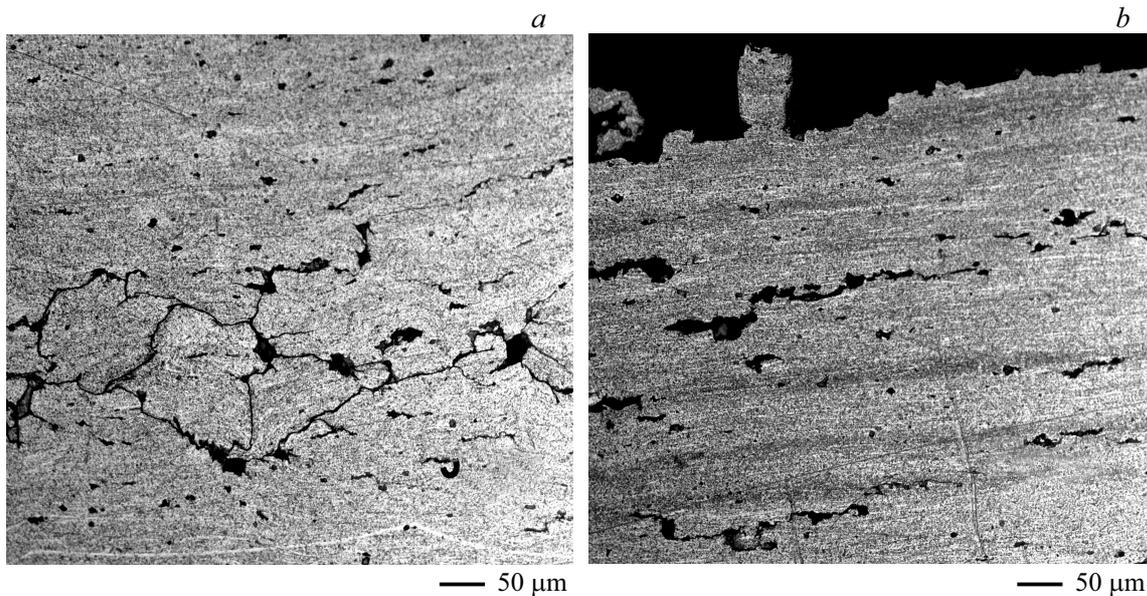


Рис. 2. Структура откольной зоны в алюминиевом сплаве 1565. *a* — толщина мишени 2.2 mm, *b* — толщина мишени 6.56 mm.

указанных характеристик резко меняется (линия NN'). Изменение величины дефекта скорости при изменении толщины мишени свидетельствует о том, что интенсивность энергообмена между структурными уровнями также меняется. Наиболее заметное изменение дефекта скорости происходит в приконтактной области ударного нагружения. В твердом теле изменение интенсивности энергообмена и масштаба структуры сказывается на величине динамической прочности материала: откольная прочность алюминиевого сплава 1565 также изменяется там, где изменяется дефект скорости. В связи с этим можно считать, что дефект скорости является контролирующим параметром ударно-волнового поведения твердотельных материалов.

Смена характера структурообразования подтверждается микроструктурными исследованиями образцов. В алюминиевом сплаве 1565 перелом в отклике материала на ударное нагружение (в поведении откольной прочности и дефекта скорости) происходит при толщине мишени 2.2 mm (рис. 1). Это изменение коррелирует с изменением масштаба структурных элементов L , размер которых сначала пороговым образом изменяется при толщине мишени 2.2 mm, а затем постепенно уменьшается с ростом толщины мишени.

Аналогичная ситуация, как известно, имеет место для турбулентности, на начальном этапе развития которой крупномасштабные вихри участвуют только в переносе энергии, и лишь в больших временных интервалах, после перехода от волновых к диффузионным процессам массопереноса, турбулентное состояние нивелируется и в процессе равновесного массопереноса осуществляется обмен энергией со средой [9]. На рис. 2 представлены фотографии микроструктуры откольной зоны мишеней толщиной 2.2 и 6.56 mm. На рис. 2, *a* видны замкну-

тые структурные образования со средним размером $\sim 150 \mu\text{m}$, ограниченные трещинами и порами. При толщине мишени 1.38 mm средний размер структурного элемента составляет $\sim 380 \mu\text{m}$. В зоне откольного разрушения мишени, где действует всестороннее растягивающее напряжение, сохраняется структура, которая зародилась в приконтактной области ударного нагружения. С увеличением толщины мишени и длительности импульса нагрузки процесс динамического деформирования приходит к равновесию, вследствие чего крупномасштабные структуры исчезают и процесс динамического деформирования переходит к однородной стадии. В этих условиях откольное разрушение материала протекает путем расслоения (рис. 2, *b*).

Во второй серии опытов мишени из алюминиевого сплава Д16 нагружали импульсами давления, создаваемыми воздействием сильноточного пучка электронов. Пучок генерировался сильноточным электронным ускорителем „Нева-01“ (НИИ электрофизической аппаратуры им. В.Д. Ефремова (Санкт-Петербург) [10]. Чтобы избежать влияния зоны облучения на параметры ударной волны, электронный пучок предварительно воздействовал на пластину-анод ускорителя, а затем давление передавалось в исследуемый образец. Максимальная величина давления составила 4.0 GPa при длительности импульса 40 ns. Импульсное нагружение привело к зарождению крупномасштабных структур, которые представляют собой объемные образования, границы которых формируются за счет разницы в скоростях их движения. В условиях кратковременного воздействия всестороннего растягивающего напряжения в откольной зоне мишени разрывы в скорости трансформируются в разрывы по смещению. В этом случае реликтовые остатки этих структур визуализируются благодаря появлению

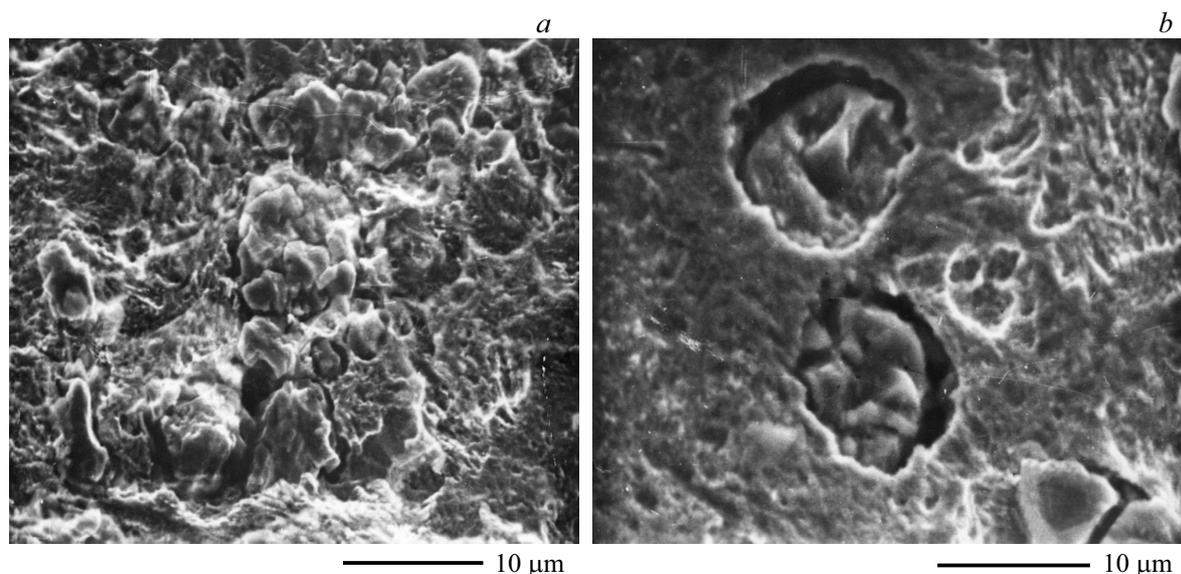


Рис. 3. Крупномасштабные структуры в откольной зоне мишени из сплава Д16 при нагружении импульсным электронным пучком. *a* — начальная стадия формирования крупномасштабной структуры в приконтактной зоне мишени; *b* — реликтовые остатки крупномасштабной структуры в откольной зоне мишени.

трещин и пор вокруг указанных структур. Примеры таких структур для начальной и конечной стадий их формирования представлены на рис. 3.

Проведенные исследования показывают, что в приконтактной области ударного и импульсного нагружения динамическое деформирование и разрушение твердотельных материалов протекают в условиях сильной неравновесности и гетерогенизации структуры, при которой зарождаются крупномасштабные структуры мезоуровня (1–10 µm).

Благодарности

Исследования проводились с использованием высокоскоростных ударных установок Института проблем машиноведения РАН, а также уникальной научной установки — сильноточного электронного ускорителя „Нева-01“ НИИ электрофизической аппаратуры им. В.Д. Ефремова. Авторы благодарят сотрудников НИИЭФА им. В.Д. Ефремова, принимавших участие в обеспечении работы сильноточного электронного ускорителя.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.Ф. Беликова, С.Н. Буравова, Е.В. Петров, *ЖТФ*, **83** (8), 68 (2013).
- [2] А.С. Власов, А.Б. Синани, *ЖТФ*, **87** (7), 1033 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44674.1992

- [3] М.А. Соковников, Д.А. Биланов, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.А. Плехов, А.И. Терехина, О.Б. Наймарк, *Письма в ЖТФ*, **40** (23), 82 (2014).
- [4] В.В. Рыбин, В.Н. Переверзенцев, Ю.В. Свирина, *ЖТФ*, **87** (5), 726 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.05.44446.2029
- [5] Т.А. Хантулева, *Нелокальная теория неравновесных процессов переноса* (Изд-во СПбГУ, СПб., 2013).
- [6] Т.А. Хантулева, Ю.И. Мещеряков, *Физ. мезомеханика*, **18** (1), 14 (2015).
- [7] T.E. Arvidsson, Y.M. Gupta, G.E. Duvall, *J. Appl. Phys.*, **46** (10), 447 (1975).
- [8] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов, *ЖТФ*, **43** (9), 1961 (1973).
- [9] T. Hintze, *Turbulence* (Mc Graw Hill, Inc., N.Y., 1962).
- [10] В.В. Белогорский, Н.Г. Беручев, Е.П. Большаков, В.В. Еремкин, В.В. Ершов, Ю.А. Истомин, О.П. Печерский, Л.В. Смирнов, А.Г. Сыромятников, Т.С. Чернобровина, В.И. Чернобровин, *Исследование работы сильноточного наносекундного ускорителя электронов НЕВА-01. Препринт К-0606* (НИИЭФА им. В.Д. Ефремова, Л., 1983).