

01.5;06.4

Микромеханизм многомасштабного динамического разрушения© Ю.И. Мещеряков¹, А.К. Диваков¹, Н.И. Жигачева¹, Г.В. Коновалов¹, А.Ф. Нечунаев²¹ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: um38@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 22 марта 2022 г.

Принято к публикации 4 апреля 2022 г.

Рассмотрена задача о распространении ударной волны в структурно-неоднородной среде и проведена серия экспериментов по ударному нагружению высокопрочной низколегированной стали АБ2. Показано, что триггерным механизмом, посредством которого происходит переключение процесса динамического деформирования и разрушения с одного масштабного уровня на другой, является резонансное взаимодействие осцилляций пластического течения в ударной волне со структурными элементами мезоскопического уровня. Существует пороговая скорость деформации, при которой дефект скорости на плато импульса резко возрастает. При скорости деформации выше пороговой в материале формируется сеть транскристаллитных микротрещин, что приводит к затуханию ударной волны.

Ключевые слова: ударное нагружение, многомасштабное деформирование, транскристаллитные трещины.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52554.19163

Целью настоящей работы является выяснение вопроса, связанного с физикой многомасштабного динамического деформирования, а именно выяснение того, какова природа „триггерного“ механизма, посредством которого происходит переключение процесса динамического деформирования и микромеханизма разрушения с одного масштабного уровня на другой. Для ответа на этот вопрос рассмотрена задача о распространении ударной волны в структурно-неоднородной среде и проведена серия экспериментов по ударному нагружению стали АБ2.

Ударно-волновые эксперименты и теоретический анализ ударно-волнового поведения структурно-неоднородной среды выявили наличие следующего корреляционного соотношения между вариацией массовой скорости динамически деформируемой среды D (корень квадратный из дисперсии скорости D^2 или среднееквадратичное отклонение скорости) и скоростью деформации $\frac{d\varepsilon}{dt}$ [1]:

$$D = R \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение известно в теории турбулентности, где интенсивность турбулентных пульсаций пропорциональна ускорению частиц среды [2]. Другой важной характеристикой ударно-деформируемой среды является так называемый „дефект скорости“ Δu , который характеризует изменение массовой скорости в ударной волне вследствие мезо–макро энергообмена. В ударно-деформируемых средах дисперсия и дефект скорости не являются независимыми величинами [3–5]:

$$\Delta u = -(1/2) (dD^2/du). \quad (2)$$

В случае одномерного распространения ударной волны уравнение баланса импульса и уравнение неразрывности

для нормальных компонент напряжения σ , деформации ε и массовой скорости u имеют следующий вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

Определяющее уравнение для замыкания балансных уравнений может быть выражено через скорость пластической деформации $\frac{\partial \varepsilon^p}{\partial t}$ в следующей форме [6]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \rho C_l^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -2\mu \frac{\partial \varepsilon^p}{\partial t}, \quad (4)$$

где C_l — продольная скорость звука, μ — модуль сдвига, ρ — плотность материала. Скорость пластической деформации в этом уравнении выражается через среднюю плотность N_d и среднюю скорость V_d подвижных дислокаций в форме уравнения Орована

$$\frac{\partial \varepsilon^p}{\partial t} = b N_d V_d.$$

В данном исследовании мы принимаем, что релаксация динамически деформируемой среды осуществляется за счет движения элементарных носителей деформации на мезоуровне. Это предполагает, что в отличие от [6] скорость пластической деформации в выражении (4) определяется скоростью изменения дефекта массовой скорости

$$\frac{\partial \varepsilon^p}{\partial t} = \frac{1}{C_l} \frac{\partial \Delta u}{\partial t}. \quad (5)$$

Преимущество такого подхода заключается в том, что в модель релаксации не включены параметры дислокационной структуры. В отличие от параметров дислокационной структуры дефект скорости является измеряемой в реальном масштабе времени величиной.

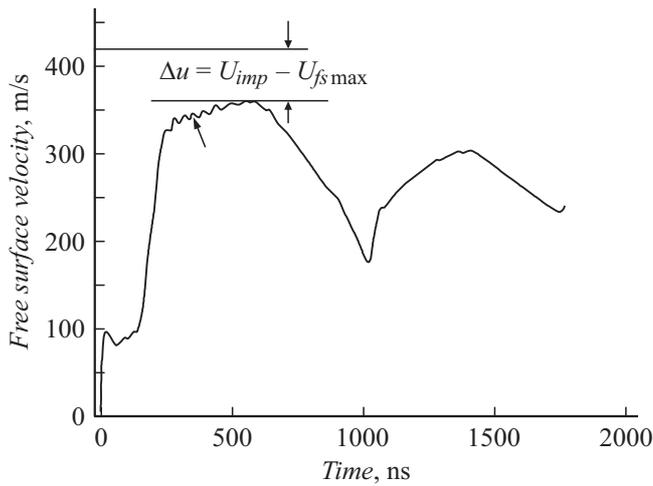


Рис. 1. Временной профиль скорости свободной поверхности U_{fs} при скорости ударника $U_{imp} = 423.9$ m/s.

Балансные уравнения (3) можно свести к уравнению

$$\rho \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = 0. \quad (6)$$

Подставляя соотношения (1) и (2) в (5), получим

$$\frac{\partial \varepsilon^p}{\partial t} = \frac{R^2}{C_l^2} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2}. \quad (7)$$

С использованием (7) приведем уравнение (6) к виду

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} - \rho C_l^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} - 2(\mu R^2 / \rho C_0^2) \frac{\partial^4 \varepsilon}{\partial x^2 \partial t^2} = 0. \quad (8)$$

В случае стационарного распространения пластической волны со скоростью C_p можно перейти к одной переменной $\xi = x - C_p t$:

$$\rho(C_p^2 - C_l^2) \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \xi^2} - 2\mu \frac{R^2}{C_p^2} \frac{\partial^4 \varepsilon}{\partial \xi^4} = 0. \quad (9)$$

После замены $\varepsilon_{\xi\xi} = \psi$ получаем

$$(C_l^2 - C_p^2)\psi + 2(\mu R^2 / \rho C_p^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} = 0. \quad (10)$$

Это уравнение осциллятора

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\rho C_p^2 (C_l^2 - C_p^2)}{2\mu R^2} \psi = 0. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что частота осцилляций равна

$$\omega^2 = \frac{\rho C_p^2}{2\mu R^2} (C_l^2 - C_p^2). \quad (12)$$

В качестве примера на рис. 1 представлен временной профиль скорости свободной поверхности U_{fs} . На профиле показаны упругий предвестник, пластический

фронт и плато с осцилляциями (указаны стрелкой) и дефектом скорости $\Delta u = U_{imp} - U_{fs \max}$. Для удара со скоростью ударника $U_{imp} = 423.9$ m/s пространственный период осцилляций равен $\sim 100 \mu\text{m}$.

В настоящей работе предполагается, что триггерным механизмом переключения процесса динамического деформирования с одного масштабного уровня на другой является резонансное взаимодействие структурных элементов мезоуровня с осцилляциями пластического течения. Резонанс наступает при совпадении пространственного периода осцилляций пластического течения и размеров структурных элементов. Для проверки выказанного предположения были проведены экспериментальные исследования ударно-волнового поведения мартенситно-бейнитной стали АБ2 (твердость 235НВ) в диапазоне скоростей ударника 122–450 m/s. В каждом опыте с помощью скоростного интерферометра регистрировали временной профиль скорости свободной поверхности $U_{fs}(t)$. Данная методика позволяет регистрировать разницу между скоростью ударника и максимальным значением скорости свободной поверхности, т.е. дефект скорости. Скорость свободной поверхности, при которой дефект скорости начинает резко возрастать, определяет порог структурного перехода. При этом изменяются две характеристики отклика материала на ударное нагружение: 1) величина вариации массовой скорости; 2) величина дефекта скорости и его разброс по скоростям. На рис. 2 представлены зависимости вариации скорости $D = f(U_{imp})$ и дефекта скорости $\Delta u = f(U_{imp})$ от скорости ударника. При скорости ударника 371.1 m/s ход кривых резко меняется (линия NN').

С целью выявления микромеханизма разрушения были выполнены микроструктурные исследования образцов. Образцы разрезали по одной из плоскостей вдоль направления удара, полировали, протравливали в 5%

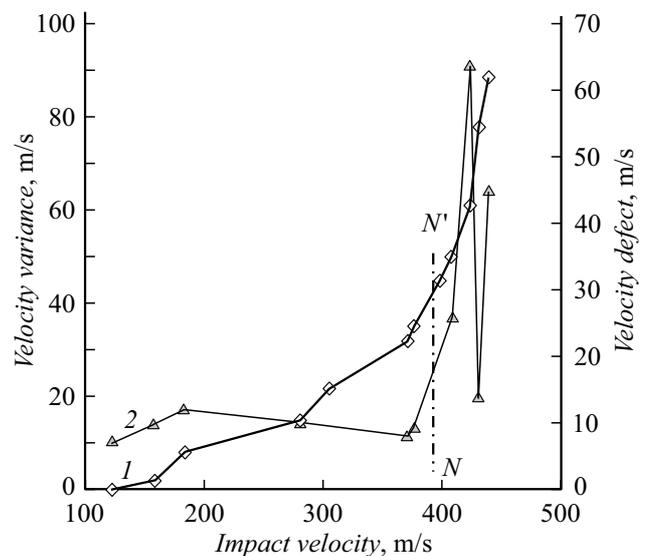


Рис. 2. Зависимости вариации массовой скорости D (1) и дефекта скорости Δu (2) от скорости ударника U_{imp} .

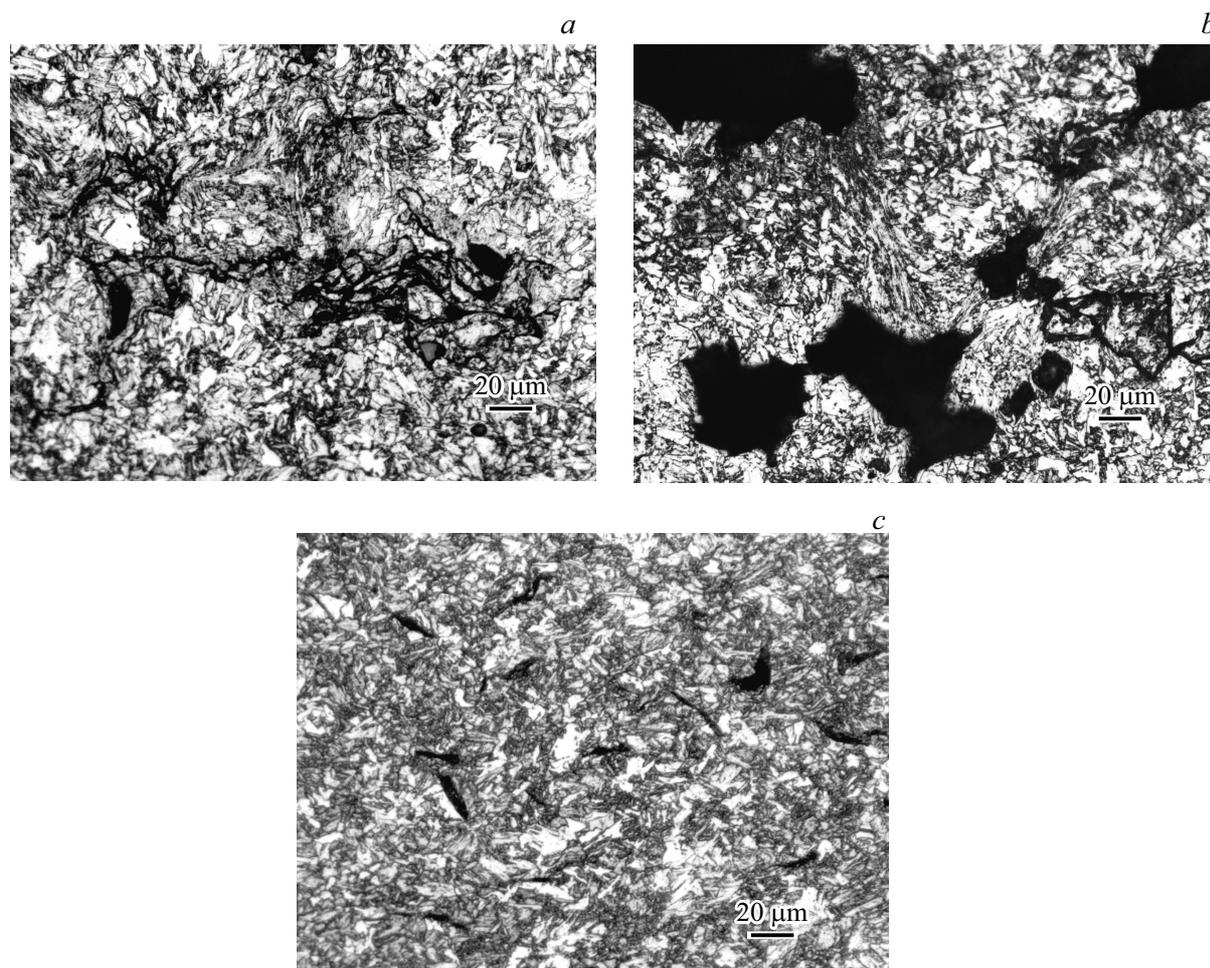


Рис. 3. Морфология разрушения стали АБ2 в „допороговом“ (*a, b*) и „запороговом“ (*c*) регионах скоростей нагружения.

растворе азотной кислоты и далее исследовали с помощью микроскопа „Axio-Observer-Z1m“. При скорости нагружения ниже пороговой скорости (в диапазоне 183–371.1 м/с) локализованная деформация и трещинообразование осуществляются по границам кристаллитов размером 5–20 мкм, причем микротрещины часто огибают крупномасштабные структуры размером 50–100 мкм, состоящие из более мелких кристаллитов (рис. 3, *a, b*). Резонансная раскачка структурных элементов под воздействием осцилляций пластического течения является триггерным процессом, в результате которого инициируется смена микромеханизма разрушения. Это приводит к разделению конгломератов на мелкомасштабные кристаллиты (рис. 3, *c*) и образованию серии коротких микротрещин. Выше пороговой скорости реализуется транскристаллитное разрушение, при котором микротрещины размером 5–20 мкм пересекают тело кристаллита. Плотность микротрещин увеличивается с ростом скорости ударного нагружения. Резкое увеличение дефекта скорости свидетельствует о сильном затухании ударной волны при „запороговых“ скоростях динамического деформирования. В связи с

этим стали типа АБ2 могут быть использованы в качестве сильнопоглощающих слоев в многослойных преградах, предназначенных для защиты от ударных нагрузок [7].

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Характерным признаком многомасштабного динамического разрушения стали АБ2 является наличие пороговой скорости деформации, при которой резко изменяется дефект скорости на плато импульса сжатия. При пороговой скорости деформации изменяется характер трещинообразования: разрушение по границам зерен сменяется транскристаллитным разрушением. Триггерным механизмом переключения микромеханизма динамического разрушения является резонансное взаимодействие структурных элементов с осцилляциями пластического течения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.A. Indeitzev, Yu.I. Meshcheryakov, A.Yu. Kuchmin, D.S. Vavilov, *Acta Mech.*, **226** (3), 917 (2014).
DOI: 10.1007/500707-014-1231-0
- [2] J.O. Hinze, *Turbulence* (McGraw Hill, Inc., N.Y., 1962).
- [3] Yu.I. Meshcheryakov, A.K. Divakov, N.I. Zhigacheva, I.P. Makarevich, K. Barakhtin, *Phys. Rev. B*, **78** (6), 064301 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevB.78.064301
- [4] Yu.I. Meshcheryakov, *Multiscale mechanics of shock wave processes* (Springer Nature, 2021).
- [5] Т.А. Хантулева, Ю.И. Мещеряков, *Физ. мезомеханика*, **19** (4), 3 (2016).
- [6] J.W. Taylor, *J. Appl. Phys.*, **36** (10), 3146 (1965).
DOI: 10.1063/1.1702940
- [7] H. Nahme, V. Hohler, A. Stilp, in *Shock compression of condensed matter-1991*, ed by S.C. Schmidt, R.D. Dick, J.W. Forbes, D.O. Tasker (Elsevier Science Publ. B.V., 1992), p. 435.