

05

О механизмах микро-макро энергообмена при ударном нагружении твердых тел

© Ю.И. Мещеряков, А.К. Диваков, Н.И. Жигачева, И.П. Макаревич,
С.Ю. Мушникова, Г.Ю. Калинин

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
E-mail: ym38@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2009 г.

На примере двух марок сталей — хромоникельмолибденовой стали 30CrNi4Mo и азотсодержащей аустенитной стали 04Cr20Ni6Mn11Mo2NVNb экспериментально исследовано два типа поведения металлов при ударном нагружении. Для первого типа передача энергии от нагрузки деформируемому телу осуществляется с участием промежуточного (мезоскопического) структурного уровня. В этом случае отклик материала на ударное нагружение характеризуется не только временным профилем средней скорости, но профилем вариации массовой скорости. Для второго типа материалов передача энергии осуществляется без участия мезоуровня, при этом вариация скорости равна нулю.

Одной из наиболее информативных характеристик динамического отклика металлов на ударное нагружение в условиях одноосной деформации (плоского соударения) является временной профиль скорости свободной поверхности, регистрируемый либо с помощью различного типа датчиков, либо интерферометрическими методами. При нагружении металлов плоскими волнами в упругопластической области, с увеличением скорости ударника крутизна стационарного пластического фронта также увеличивается, т.е. скорость деформации на пластическом фронте возрастает. Одновременно увеличивается и скорость самого пластического фронта. Такое поведение характерно для меди, алюминия, титана, различных сталей и других материалов. Вместе с тем имеются материалы, которые при идентичных условиях ударного нагружения показывают совершенно иное поведение. В этих материалах при увеличении скорости ударного нагружения наклон пластического фронта остается постоянным, в то время как скорость распространения фронта уменьшается.

Поскольку на подобное поведение не влияет тип кристаллической структуры материала, можно предположить, что в основе его лежат не только процессы на атомно-дислокационном уровне, но также и более крупномасштабные процессы, относящиеся к мезоскопическому уровню. Очевидно, что для проверки данной гипотезы недостаточно данных о поведении временного профиля средней массовой скорости, который характеризует интегральный (макроскопический) отклик материала на ударное нагружение. Необходимо также иметь возможность регистрации динамического отклика на мезоуровне. В качестве количественной характеристики подвижности структуры на мезоуровне может служить вариация массовой скорости — корень квадратный из дисперсии массовой скорости мезоструктур.

В процессе выполнения настоящего исследования были проведены эксперименты по ударному нагружению двух металлов — хромоникельмолибденовой стали 30CrNi4Mo, имеющей твердость 390HV, и азотсодержащей аустенитной стали 04Cr20Ni6Mn11Mo2NVNb, имеющей твердость 254HV. Ударные испытания плоских мишеней указанных материалов (толщина мишени 5 mm, толщина ударника 2 mm) проводились на легкогазовой пушке калибра 37 mm. Скорость свободной поверхности регистрировали с помощью скоростного интерферометра [1]. В каждом опыте кроме профиля средней скорости U_{fs} и скорости ударника U_{imp} регистрировали вариацию скорости D .

На рис. 1 и 2 приведены временные профили скорости свободной поверхности для стали 30CrNi4Mo и стали 04Cr20Ni6Mn11Mo2NVNb, снятые для нескольких скоростей ударника. Из сопоставления профилей можно сделать следующие выводы:

а) с увеличением скорости ударника временные профили стали 30CrNi4Mo становятся круче, в то время как профили для азотсодержащей стали свой наклон не изменяют;

б) в стали 30CrNi4Mo имеется вариация массовой скорости, в то время как в азотсодержащей стали вариация массовой скорости отсутствует.

Наличие вариации скорости свидетельствует о том, что в процессе динамического деформирования материала протекают релаксационные процессы на мезоуровне, результатом которых являются относительные смещения структурных элементов относительно друг друга, приводящие к пульсациям массовой скорости. При этом вариация скорости характеризует усредненный отклик материала на пульсации массовой

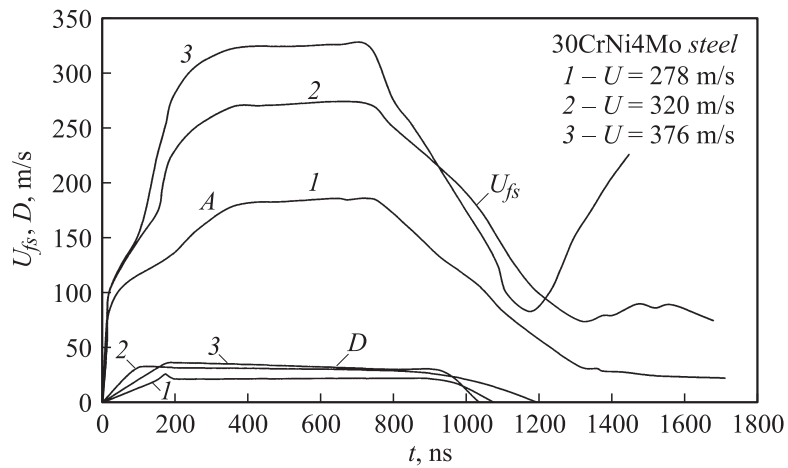


Рис. 1. Временные профили скорости свободной поверхности u_{fs} и вариации скорости D для стали 30CrNi4Mo.

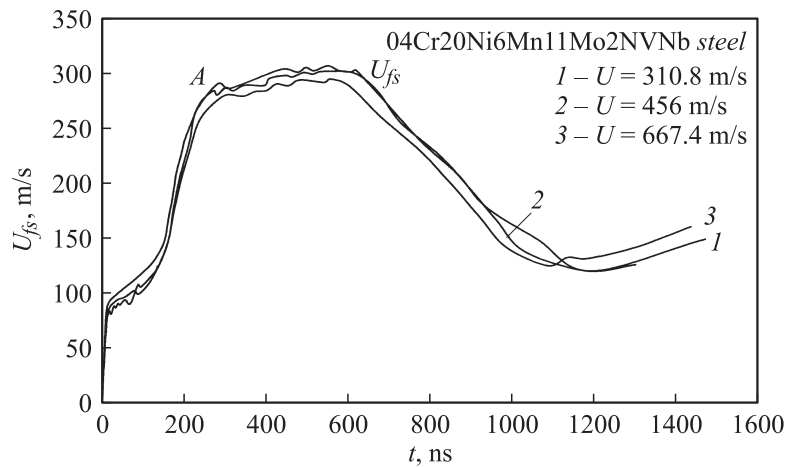


Рис. 2. Временные профили скорости свободной поверхности u_{fs} и вариации скорости D для стали 04Cr20Ni6Mn11Mo2NVNb.

скорости на мезоуровне. Если вариация скорости равна нулю, это означает, что в данном материале крупномасштабные пульсации не возбуждаются и реализуется прямой переход от атомно-дислокационного уровня деформирования к макроскопическому.

Независимое измерение скорости ударника и скорости свободной поверхности позволяет определять в каждом опыте величину так называемого дефекта скорости — разности между скоростью ударника U_{imp} при симметричном соударении и скоростью свободной поверхности: $\Delta U = U_{imp} - U_{fs}$. Испытания показали, что дефект скорости для стали 30CrNi4Mo остается примерно постоянным, в то время как для азотосодержащей стали со скоростью 310 м/с он начинает резко увеличиваться.

Важной характеристикой отклика материала на ударное нагружение, наряду с динамическим пределом текучести, является порог структурной неустойчивости, который характеризует переход материала в так называемое „конвективное“ состояние [2–4]. Как показывает эксперимент, продолжительность „конвективного“ состояния в меди равна 0.4–0.7 μs [5]. В случае одноосного деформирования порог неустойчивости определяется значением скорости свободной поверхности, при которой происходит переход пластического фронта в плато импульса сжатия (точка А на рис. 1). С физической точки зрения этот переход определяет порог необратимой передачи энергии на атомно-дислокационный уровень. Можно заметить, что для материала первого типа (рис. 1) с увеличением скорости ударника порог неустойчивости повышается, в то время как дефект скорости на плато импульса сжатия остается постоянным. Для материала второго типа (рис. 2), наоборот, порог неустойчивости остается постоянным, а дефект массовой скорости линейно нарастает со скоростью ударника. Поскольку дефект массовой скорости является мерой энергии, переданной от внешней нагрузки деформируемому телу, такая разница в отклике на ударное нагружение свидетельствует о разных механизмах передачи энергии.

Проводя аналогию между поведением ударно-деформируемого материала в структурно-неустойчивом „конвективном“ состоянии и поведением жидкости в турбулентном режиме течения [6], можно сказать, что как и в случае турбулентной жидкости, крупномасштабные пульсации скорости в твердом теле осуществляют перенос энергии от нагрузки (макроскопический уровень) к движению среды на уровне элементарных носителей пластической деформации. Наличие дисперсии

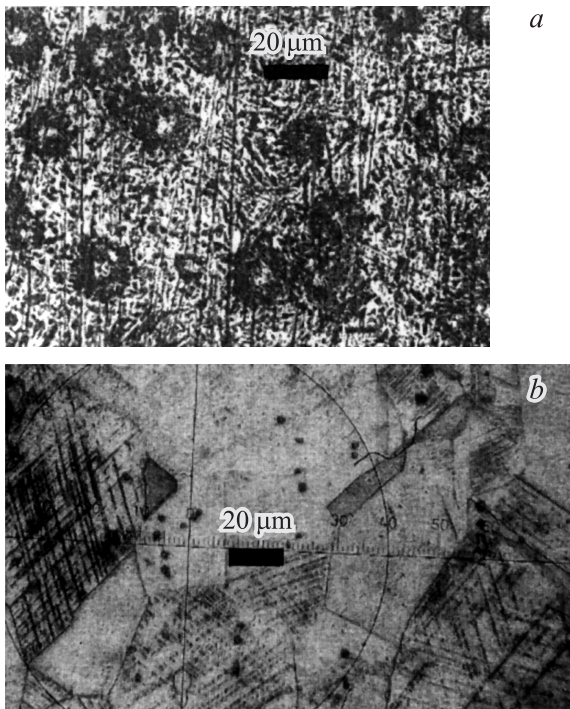


Рис. 3. Структура стали 30CrNi4Mo (*a*) и стали 04Cr20Ni6Mn11Mo2NVNb (*b*) после ударного нагружения со скоростью ~ 350 м/с.

массовой скорости задерживает необратимую стадию передачи энергии с макроуровня на микроуровень. Результатом этой задержки является повышение пороговой скорости этого перехода, что и наблюдается в случае стали 30CrNi4Mo.

В том случае, когда крупномасштабные пульсации отсутствуют и вариация скорости на мезоуровне равна нулю, имеет место прямая передача энергии от внешней нагрузки на атомно-дислокационный уровень. На рис. 3 представлены микроструктуры поперечного разреза мишеней из обеих марок стали после ударного нагружения при примерно одинаковой скорости ударника ~ 350 м/с. Исследования проводили на оптическом микроскопе „NEOPHOT 32“. На рис. 3, *a* видны ротационные ячей-

ки, по своему масштабу относящиеся к мезоуровню. Наличие, с одной стороны, дисперсии массовой скорости при регистрации скорости свободной поверхности и, с другой стороны, ротационных ячеек в образцах после ударного нагружения подтверждает факт участия мезоуровня в процессе динамического деформирования стали 30CrNi4Mo. На рис. 3, *b* представлена микроструктура поперечного шлифа азотосодержащей стали, на которой видны только следы интенсивного двойникования. Двойникование обнаружено на всех образцах, подвергнутых ударному нагружению в диапазоне скоростей 300–700 м/с, причем плотность двойников остается примерно постоянной во всем диапазоне ударного нагружения. Это позволяет утверждать, что из-за низкого порога двойникования аустенитной азотосодержащей стали в динамическом деформировании участвуют только элементарные носители деформации на уровне дислокаций и двойников. Иными словами, имеет место прямой энергообмен между макроскопическим уровнем деформирования и микроскопическим уровнем, без участия мезоуровня. Порог двойникования определяется напряжением, при котором происходит перелом на профиле скорости свободной поверхности (точка А на рис. 2, соответствующая скорости свободной поверхности мишени ~ 280 м/с). Для азотосодержащей стали порог двойникования равен ~ 1.1 ГПа.

Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что низкая величина порога двойникования в азотосодержащей стали препятствует зарождению мезоструктурного уровня деформирования. При этом исключается промежуточная стадия структурирования и фрагментации материала на мезоскопическом масштабном уровне, что повышает его динамическую прочность.

Работа выполняется при поддержке РФФИ по проектам 08-02-00329 и 08-02-00304.

Список литературы

- [1] *Mescheryakov Yu.I., Divakov A.K.* // *Dymat Journal*. 1994. V. 1. N 4. P. 271–287.
- [2] *Олемской А.И., Наумов И.И., Панин В.Е.* // *Изв. вузов. Физика*. 1986. № 6. С. 34–40.
- [3] *Канель Г.И., Дремин А.Н., Молодец А.М.* // *ФММ*. 1978. Т. 46. № 1. 200–203.

- [4] Meshcheryakov Yu.I., Divakov A.K., Zhigacheva N.I., Makarevich I.P., Barakhtin B.K. // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 64301–64316.
- [5] Skokov V.I., Ignatova O.N., Malyshev A.N., Podurets A.M., Raevsky V.A., Zocher M.A. // Shock Compression of Condensed Matter-2007 / Eds. M. Elert et al. AIP Conference Proceedings-955. 2008. P. 597–600.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.