

УДК 539.374

## МНОГОМАСШТАБНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕТАЛЛОВ

С. А. Атрошенко

*Институт проблем машиноведения РАН  
199178, С. Петербург, В. О., Большой пр., 61  
E-mail: [satroshe@atr.ipme.ru](mailto:satroshe@atr.ipme.ru)*

Исследованию подвергались ОЦК, ГЦК и ГПУ металлы. Образцы имели форму дисков диаметром 52 мм и толщиной 5 и 10 мм. Ударное нагружение осуществлялось с помощью легкогазовой пневматической пушки калибра 37 мм. При нагружении в интервале скоростей 150-650 м/с ударником толщиной 1-3 мм в мишенях осуществлялся тыльный откол. Процессы локализации деформации изучались на двух масштабных уровнях с использованием метода регистрационных сеток мезоуровня, нанесенных на составных мишенях. Исследовались трансляционные и ротационные моды деформации.

### ВВЕДЕНИЕ

Разрушение гетерогенных материалов происходит с образованием трещин различных масштабов. Наблюдается сходство между разрушением на различных масштабных уровнях. Изучение закономерностей последовательного формирования иерархии масштабных уровней при динамическом разрушении представляет большой интерес. Как видно из огромного фактического материала, разрушение принципиально нельзя свести к какому бы то ни было монопроцессу. Разрушение реального твердого тела представляет собой сложный комплекс многих взаимосвязанных или дополняющих друг друга процессов, идущих одновременно или попеременно подготавливающих друг друга на разных масштабных уровнях.

Происходит динамическая передача энергии макроскопического движения среды при ударном нагружении во внутренние перемещения на мезоуровне в виде трансляционных или ротационных мод деформации.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованию подвергались ОЦК, ГЦК и ГПУ металлы. В качестве ОЦК металлов были взяты перлитные стали: углеродистая сталь 45 и конструкционная сталь 30ХН4М. Из ГЦК металлов исследовались алюминий А6, медь М2 и М3 и аустенитная сталь 12Х18Н10Т. В качестве ГПУ металлов были выбраны технически чистый титан ВТ1-00 и  $\alpha$ -сплав ВТ5. Одновременно исследования проводились и на двухфазном титановом ГЦК+ОЦК сплаве ВТ6. Образцы имели форму дисков диаметром 52 мм и толщиной 5 и 10 мм. Ударное нагружение осуществлялось с помощью легкогазовой пневматической пушки калибра 37 мм. При нагружении в интервале скоростей 150-650 м/с ударником толщиной 1-3 мм в мишенях осуществлялся тыльный откол. Режим тыльного откола был выбран, чтобы исключить многократное прохождение волн через образец. Для исследования процессов локализации деформации на мезоуровне использовался метод регистрационных сеток. Сетки наносились до ударного нагружения на предварительно отполированные половинки мишени, которые затем соединялись в специальной оправке и подвергались деформации. Поверхность образца с нанесенной

сеткой располагалась вдоль направления распространения ударной волны. Сетка наносилась алмазной пирамидкой с помощью микротвердомера ПИМТ-3.

### МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Процесс динамической деформации носит многоуровневый характер. В работе измерены углы:  $\theta$  – угол наклона откольных трещин,  $\phi$  – угол наклона полос сдвига и  $\varphi$  – угол поворота материала. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

МЕТАЛЛ	РЕШЕТКА	V, м/с	d, $\mu$ м	$\varepsilon$ , %	$\theta$ , °	$\phi$ , °	$\varphi$ , °
Сталь 45	ОЦК	212	150	20	0, 90, 45-50		
Сталь 30ХН4М	ОЦК	351	10	10	45, 90	10	
Сталь 12Х18Н10Т	ГЦК	368	46	20	90	Внутри зерна	
Медь М2	ГЦК	153	280	12	81-90	62	16-180
Медь М3	ГЦК	205	250	10	0	40	45-90
Алюминий А6	ГЦК	389	760	10	90	4-27	
ВТ 1-00	ГПУ	522	200	4	45	45	45
ВТ5	ГПУ	663	280	10	45	Внутри зерна	45
ВТ6	ОЦК+ГПУ	598	170	4	90	17	

V – скорость нагружения; d – размер зерна;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $\theta$  – угол наклона откольной трещины;  $\phi$  – угол наклона полос сдвига, пересекающих зерна;  $\varphi$  – угол поворота.

### ТРАНСЛЯЦИОННЫЕ МОДЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Угол  $\phi$  можно отнести к суперструктурному уровню, когда он относится к полосам сдвига, пересекающим зерна, и к мезоуровню, когда речь идет о процессе внутри зерен.

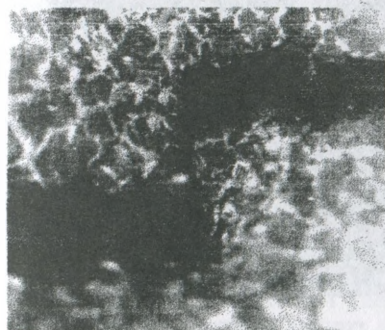
Таблица 2.

МЕТАЛЛ	ТИП РЕШЕТКИ	W*, МПа
Сталь 45	ОЦК	4,56
Сталь 30ХН4М	ОЦК	9,12
Сталь 12Х18Н10Т	ГЦК	5,02
Медь М2	ГЦК	2,60
Медь М3	ГЦК	2,52
Алюминий А6	ГЦК	1,95
Сплав ВТ1	ГПУ	7,20
Сплав ВТ5	ГПУ	9,13
Сплав ВТ6	ГПУ+ОЦК	7,75

W\* – откольная прочность взята из работ Ю.И. Мещерякова с сотрудниками, Г.И. Канеля, С.В.Разоренова и А.В. Уткина

В то же время деформация в стали 12Х18Н10Т и сплаве ВТ5 происходит только на мезоскопическом масштабном уровне – внутри зерен, несмотря на то, что откольное разрушение в этих материалах происходит на суперструктурном уровне. Трансляционные моды деформации обнаружены в стали 30ХН4М, меди МЗ и сплаве ВТ6 на двух масштабных уровнях одновременно – суперструктурном и мезоскопическом. Кроме того, их угол наклона по отношению к направлению распространения волны существенно отличается для соседних масштабных уровней. В то время как для суперструктурного масштабного уровня он составляет  $\phi_{sp}=10^\circ$  для стали 30ХН4М, для мезоскопического он равен  $\phi_{am}=45^\circ$ . Аналогично для меди МЗ  $\phi_{sp}=40^\circ$ ,  $\phi_{sm}=15-17^\circ$ , а для сплава ВТ6  $\phi_{sp}=17^\circ$ ,  $\phi_{am}=76^\circ$ . Таким образом, этот угол меняется как бы в противофазе при переходе от одного масштабного уровня к другому аналогично механическим характеристикам, исследованным в работе [1].

Откольное разрушение описывается углом наклона откольной трещины к направлению распространения волны -  $\theta$ . Наблюдается три основных положения откольной трещины к направлению распространения волны: 1 – вдоль направления распространения ударной волны, 2 – вдоль фронта волны и 3 – вдоль максимальных касательных напряжений. Примеры откольных щелей приведены на рис. 1. Сравнение данных таблицы 1 и 2 приводит к выводу, что максимальная откольная прочность соответствует углу  $\theta = 45^\circ$ . При возрастании интенсивности воздействия происходит включение новых уровней при добавлении энергии, которое происходит в соответствии с принципом минимума потенциальной энергии.



а)



б)

Рис. 1. Разрушение стали 45 (а  $\times 125$ ) и стали 30ХН4М.

## РОТАЦИОННЫЕ МОДЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Кроме описанных механизмов деформации, локализация разрушения в меди и титане осуществлялась также с помощью ротационной моды, как это было показано ранее [2] для некоторых металлов. В настоящем исследовании с помощью метода делительных сеток удалось измерить углы поворота материала. Они составляют  $45^\circ$  в титане и сплаве ВТ5, примерно  $90^\circ$  в меди МЗ (рис. 2) и  $135^\circ$  в меди М2. Предложена формула для определения угла поворота  $\varphi$ :

$$\varphi = k \sum |a| / nd, \quad (1)$$

где  $a$  – продольное смещение сетки по отношению к начальному положению (до деформации),  $d$  – размер зерна,  $k=21,2$  – эмпирическая константа.



Рис.2. Ротационное разрушение в меди М3.

Отчетливо видна разница между ГПУ (титан) и ГЦК (медь) металлами. Угол поворота в ГПУ металлах меньше, чем в ГЦК и совпадает с направлением максимальных касательных напряжений. ГПУ титановый сплав ВТ5 с трансляционной  $\theta = 45^\circ$  и ротационной  $\varphi = 45^\circ$  модой разрушения имеет максимальную откольную прочность. Кроме того, углы этих двух мод деформации и разрушения совпадают. В ГПУ+ОЦК титановом сплаве ВТ6 деформация и разрушение осуществляется по трансляционному механизму на суперструктурном и ротационным механизмом на мезоскопическом масштабном уровне (рис.3).

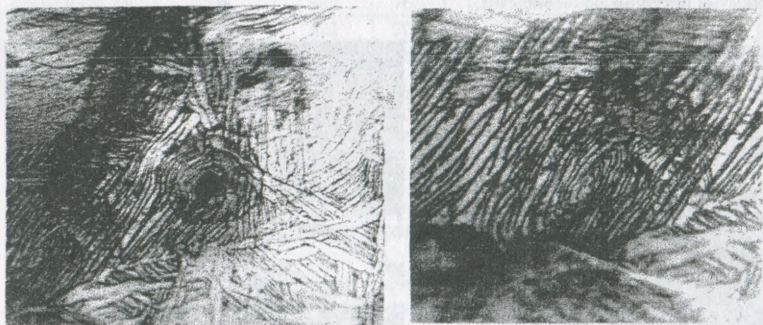


Рис.3. Ротационные моды деформации на мезоуровне в сплаве ВТ6.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшей откольной прочностью обладают материалы, деформирующиеся одновременно на двух масштабных уровнях: суперструктурном и мезоскопическом – титановый сплав ВТ5 и сталь 30ХН4М. Причем, углы трансляционных мод деформации значительно больше на мезоскопическом, чем на суперструктурном уровне.

### Список литературы

1. Mescheryakov, Yu.I., Mahutov N.A., Atroshenko S.A. Micromechanisms of dynamic fracture of ductile high-strength steel//J. Mech. Phys. Solids, 1994, V.42, № 9, pp.1435-1457.
2. Mescheryakov, Yu.I. and Atroshenko, S.A. Multiscale rotations in dynamically deformed solids//Int. J. Solids Structures, 1992, V.29, № 22, 2761-2778.