

05

©1994 г.

## КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ УРОВНЕЙ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

*Ю.И. Мещеряков, В.Б. Васильков*

Институт проблем машиноведения,  
199178, Санкт-Петербург  
(Поступило в Редакцию 18 ноября 1993 г.)

На примере двух марок вязкой стали 28ХЗСНМВФА и 38ХНЗМФА экспериментально показано, что динамическая прочность материала определяется кинетикой и взаимодействием микроструктуры на двух масштабных уровнях: мезоскопическом (0.1–10 мкм) и суперструктурном (2–10 размеров зерна). Это взаимодействие приводит к противофазному поведению релаксационных и прочностных характеристик материала на соседних структурных уровнях. При этом дисперсия массовой скорости частиц в волне нагрузки на том или ином масштабном уровне характеризует интенсивность релаксационных процессов, протекающих на этом уровне. В частности, чем выше величина дисперсии на мезоуровне, тем выше динамическая прочность материала. Установлено, что локальные резонансные взаимодействия суперструктурных микрообъемов с импульсным напряжением нагрузки приводят к резкому снижению динамической прочности материала.

### Введение

Для квазистатических режимов нагружения в последнее десятилетие было убедительно показано, что макроскопические механические свойства материала в значительной мере определяются кинетикой процессов на так называемом мезоскопическом уровне деформирования (0.1–10 мкм) [1–3]. Что касается динамических режимов нагружения, в том числе и ударно-волновых, то имеется существенный пробел в понимании той роли, которую играет деление структуры материала на разные масштабные уровни, а также физических механизмов, ответственных за его структурную перестройку. Главным ограничением здесь является невозможность исследовать эти процессы в реальном времени традиционными методами оптической и электронной микроскопии. Тем не менее благодаря определенным успехам в развитии методов локальной диагностики быстротекущих процессов становится возможным изучать многомасштабные процессы структурной перестройки, происходящие на малых масштабах (1–100 мкм) и на относительно коротких временных интервалах ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с).

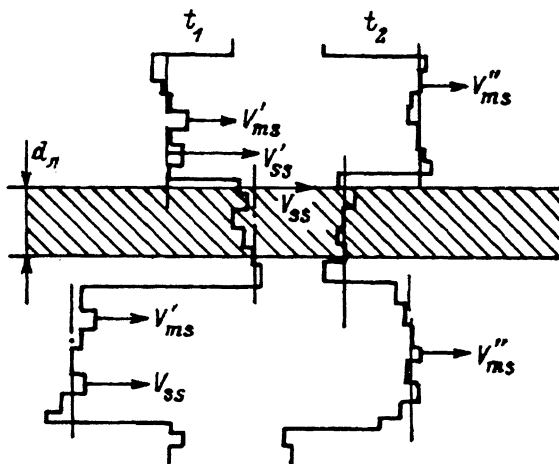


Рис. 1. Конфигурация пластического фронта в пространстве скоростей для двух случайных моментов времени.

Проведенные в настоящей работе исследования взаимосвязи кинетики элементарных процессов пластической деформации с прочностными характеристиками материалов базируются на уникальной возможности лазерного интерферометра измерять одновременно две динамические характеристики, одна из которых по своему масштабу относится к мезоуровню, а вторая — к так называемому суперструктурному масштабному уровню (2–10 размеров зерен по классификации [4]), занимающему промежуточное положение между мезо- и макроуровнем. Первая характеристика количественно определяет разброс мезообъемов по скоростям как корень из дисперсии локальных скоростей мезообъемов в пределах диаметра лазерного луча, зондирующего свободную поверхность ударно-нагруженной мишени. Вторая измеряемая величина характеризует движение одного суперструктурного элемента как целого. Причины и механизмы возникновения суперструктурного масштабного уровня пока до конца не выяснены, однако факт его существования при некоторых режимах динамического деформирования и разрушения, например при отколе, является установленным [5].

Конфигурация волнового фронта для двух случайных моментов времени условно показана на рис. 1. Из него видно, что скорость одного суперструктурного элемента  $U_{ss}$  среды является результатом усреднения мгновенных скоростей мезообъемов  $U_{ms}$ . В то же время макроскопическая скорость является средней от мгновенных скоростей суперструктурных элементов. Поскольку диаметр зондирующего лазерного луча совпадает с размером одного суперструктурного элемента, то интерферометрическая методика позволяет за один акт ударного нагружения определять только скоростную дисперсию мезообъемов. Для получения аналогичной величины на суперструктурном уровне необходимо проведение нескольких идентичных экспериментов или же зондирование поверхности мишени несколькими лучами одновременно. Более простой представляется первая методика, поскольку для выполнения многоканального зондирования требуется лазер большой мощности и сложная система светоделителей.

В качестве характеристики динамической прочности материалов используют величину напряжения, при котором происходит тыльный откол как результат интерференции волн разгрузки, инициированных высокоскоростным соударением пластин. Однако, как будет показано ниже, одной этой характеристики оказывается недостаточно для оценки эксплуатационных свойств материалов с точки зрения их динамической прочности. Как оказалось, не менее важной характеристикой является порог динамической устойчивости на сдвиг, при котором материал переходит в структурно неустойчивое состояние и резко снижает, если не теряет вообще, сопротивляемость динамическому сжатию. Более того, для некоторых материалов этот порог оказывается ниже величины откольной прочности и, следовательно, эксплуатационные характеристики материала в этом случае должны оцениваться по второму критерию, а не по величине откольного напряжения. В то время как тыльный откол характеризует динамическую прочность на разрыв и является результатом интерференции волн разгрузки, порог динамической устойчивости на сдвиг определяется состоянием материала на переднем фронте нагруженного импульса.

### Методика эксперимента

В настоящей работе исследованы обе упомянутые характеристики материала в условиях одноосного нагружения в диапазоне скоростей 100–500 м/с. В качестве материала мишеней использованы хорошо отожженные вязкие стали 28ХЗСНМВФА и 38ХНЗМФА. Для ударного нагружения плоских образцов в форме шайб толщиной 10 и 5 мм и диаметром 52 мм использовали однокаскадную легкогазовую пушку калибра 37 мм. При толщине пластины-ударника 2–3 мм в большинстве опытов был реализован тыльный откол.

Временные профили скорости свободной поверхности мишеней регистрировали с помощью двухканального дифференциального интерферометра типа "VISAR". Методика позволяет регистрировать кроме средней скорости частиц свободной поверхности еще и их распределение по скоростям в пределах диаметра лазерного луча [6]. Последнее определяет кинетику мезообъемов в волне нагрузки и как будет видно позднее, непосредственно связано с обеими вышеупомянутыми характеристиками динамической прочности материала. Профили изменения во времени скоростной дисперсии частиц на мезоуровне вдоль импульса сжатия были получены на основе измерения контраста интерференционного сигнала  $I$ , который связан с дисперсией скорости частиц  $\Delta U_{ms}^2$  соотношением

$$I = \exp \left[ -\frac{\pi^2}{2} \frac{\Delta U_{ms}^2}{U_i^2} \right], \quad (1)$$

где  $U_i$  — постоянная интерферометра [6].

Поскольку лазерный луч интерферометра, сфокусированный до пятна диаметром 120–150 мкм, регистрирует только локальный отклик материала мишени, то все данные по динамической прочности имеют смысл локальных характеристик, относящихся к суперструктурному масштабному уровню. Для получения макроскопических характеристик необходимо провести усреднение по серии однотипных опытов.

В настоящих экспериментах данная процедура оказалась возможной, для чего при одной и той же скорости осуществлялось не менее чем трехкратное ударное нагружение материала.

Величину напряжения на пластическом фронте (напряжение Гюгонио) рассчитывали по формуле

$$\sigma_h = \sigma_e + \frac{\rho D}{2}(U_{pl} - U_e), \quad (2)$$

где  $\sigma_e$  — напряжение на упругом предвестнике, определяемое как

$$\sigma_e = \frac{1}{2}\rho C_0 U_e. \quad (3)$$

Здесь  $C_e$  — скорость продольных упругих волн,  $U_e$  и  $U_{pl}$  — скорости свободной поверхности на упругом предвестнике и пластическом фронте соответственно,  $D$  — скорость пластического фронта импульса сжатия. Последняя определялась по задержке пластического фронта относительно упругого предвестника, причем отсчет временной задержки осуществлялся между серединами упругого и пластического фронтов [7]. Величина напряжения на пластическом фронте, соответствующая динамическому порогу устойчивости на сдвиг, находится из выражения (2), в котором  $U_{pl} = U_{sh}$ , где  $U_{sh}$  — массовая скорость, соответствующая потери устойчивости на сдвиг.

## Результаты и обсуждение

1. Сталь 28Х3СНМВФА. Результаты ударных испытаний стали 28Х3СНМВФА представлены в табл. 1. На рис. 2 приведены три наиболее характерных типа интерферограмм и соответствующих им временных профиля свободной поверхности, отражающие различия в динамическом отклике материала на суперструктурном уровне. Первая интерферограмма соответствует стационарному упруго-пластическому профилю с отчетливо выраженными упругим предвестником ( $\sim 60$  м/с), передним пластическим фронтом и задним фронтом с откольным минимумом. Интерферограмме, представленной на рис. 2,б, соответствует упругий предвестник, который нарастает ступенчатым образом до амплитуды 0.47 ГПа. Ступеньки появляются задолго до основного упругого фронта и имеют дискретный спектр скоростей распространения от 7.5 до 6 км/с. Не останавливаясь подробно на этом факте, отметим, что ранее в работе [8] на примере нержавеющей стали 12Х18Н10Т было показано, что за появление этих ступенек ответственны локальные мартенситные превращения, фронты которых распространяются со сверхзвуковой скоростью.

Наконец, третья интерферограмма, представленная на рис. 2,в, характеризуется наличием осцилляций за фронтом упругого предвестника при одновременном значительном уменьшении его амплитуды. Период осцилляций, равный 20 нс, соизмерим с длительностью упругого предвестника, что и является, на наш взгляд, причиной интенсивного отбора его энергии для резонансной раскачки этих осцилляций.

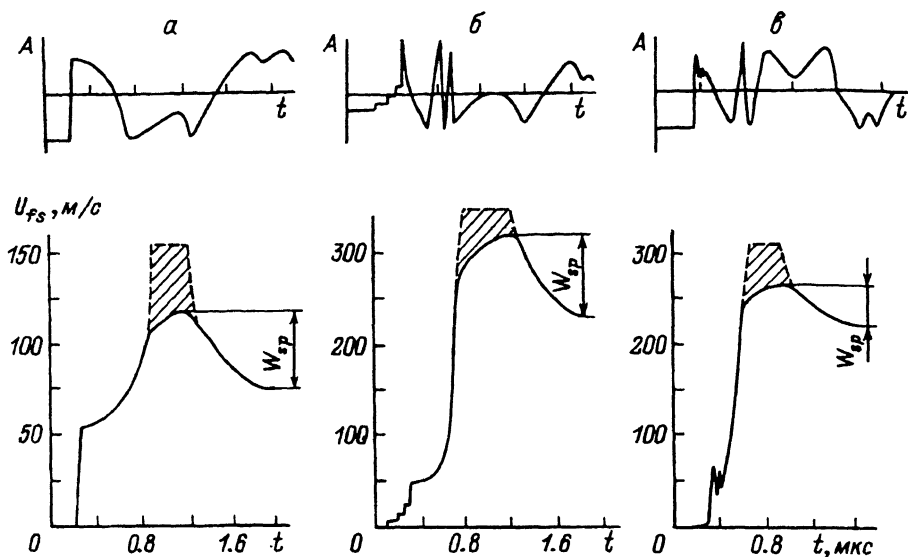


Рис. 2. Интерферограммы и временные профили средней скорости свободной поверхности для трех типов отклика мишеней из стали 28Х3СНМВФА на импульсное нагружение.

Таблица 1. Результаты ударных испытаний мишеней из стали 28Х3СНМВФА

| Порядковый номер | $h_m$ , мм | $h_{fl}$ , мм | $U_{fl}$ , м/с | $U_{sh}$ , м/с | $W_{sp}$ , м/с | $\Delta U_{ма}$ , м/с | $U_{max}$ , м/с | $U_e$ , м/с |
|------------------|------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1*               | 9.37       | 3.1           | 97.5           | 56             | 52             | 0                     | —               | 25          |
| 2*               | 9.96       | 3.07          | 130.9          | 70             | 37             | 0                     | 83              | 43          |
| 3*               | 10.58      | 3.1           | 142            | 75             | 52             | 0                     | 90              | 40          |
| 4                | 10.42      | 3.09          | 152.5          | 100            | 79             | 0                     | 116             | 50          |
| 5                | 9.27       | 3.1           | 155.5          | 100            | 74             | 0                     | 126             | 47          |
| 6                | 10.1       | 3.09          | 180.0          | 113            | 68             | 0                     | 166             | 35          |
| 7                | 10.0       | 3.09          | 196            | 159            | 78             | 0                     | 152             | 61          |
| 8                | 9.96       | 3.09          | 196            | 150            | 75             | 0                     | 165             | 50          |
| 9                | 8.97       | 3.09          | 196            | 158            | 69             | 0                     | 164             | 55          |
| 10               | 11.87      | 2.92          | 213            | 151            | 87             | 0                     | 182             | 50          |
| 11*              | 9.99       | 3.08          | 269            | 186            | 49             | 0                     | 190             | 50          |
| 12               | 9.99       | 3.08          | 308            | 242            | 78             | 12                    | 250             | 57          |
| 13*              | 10.0       | 3.07          | 311            | 238            | 53             | 14                    | 265             | 50          |
| 14               | 10.1       | 3.1           | 318            | 250            | 77.5           | 10                    | 270             | 50          |
| 15*              | 8.54       | 3.04          | 350            | 270            | 44.4           | 27                    | 307             | 39          |
| 16               | 8.46       | 3.08          | 376            | 311            | 91             | 18                    | 350             | 60          |
| 17               | 11.7       | 2.87          | 380            | 326            | 126            | 46                    | 357             | 65          |
| 18               | 11.67      | 2.91          | 345            | 330            | 130            | 33                    | 360             | 63          |

\* означает наличие осцилляций за фронтом упругого предвестника.

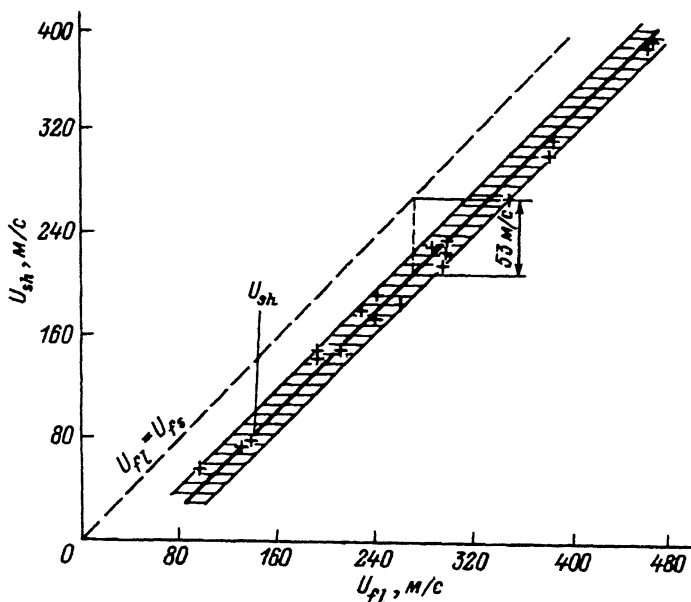


Рис. 3. Зависимость порога динамической устойчивости на сдвиг от скорости ударника для стали 28X3СНМВФА.

На рис. 3 представлена зависимость величины порога динамической устойчивости на сдвиг  $U_{sh}$  от скорости ударника. Эта зависимость, несмотря на некоторый разброс значений  $U_{sh}$ , вызванный локальным характером методики измерения, укладывается на прямую, подчиняющуюся уравнению  $U_{sh} = U_{fl} - U_0$ , где  $U_{fl}$  — скорость ударника, а постоянная  $U_0 = 53$  м/с. Заметим, что если выбросить из рассмотрения те значения амплитуды упругого предвестника, на которые наложился осцилляция, то средняя величина его составит  $U_e = 53$  м/с. Это значение совпадает с величиной смещения  $U_0$  зависимости  $U_{sh} = f(U_{fl})$ . Как известно, максимальное значение скорости свободной поверхности вдвое больше массовой скорости частиц и равно скорости ударника, если последний изготовлен из того же материала, что и мишень. Таким образом, для данной стали во всем диапазоне скоростей нагружения величина порога динамической устойчивости на сдвиг оказалась уменьшенной по отношению к скорости ударника на величину упругого предвестника. Этот результат коррелирует с анализом [9] относительно взаимодействия упругого предвестника, отраженного от свободной поверхности мишени с набегающим пластическим фронтом.

Обратимся ко второй характеристике динамической почности — величине откольного напряжения  $\sigma_{sp}$ . В акустическом приближении последняя может быть рассчитана из соотношения

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho C_l W, \quad (4)$$

где  $W = U_{max} - U_{sp}$  — разность между максимальным значением скорости свободной поверхности на плато импульса сжатия и ее значением в первом минимуме на заднем фронте.

Более точные данные о величине откольного напряжения следуют из учета упруго-пластического характера процесса динамического растяжения в зоне откола. В соответствии с [10] величина откольного напряжения определяется суммой

$$\sigma_{sp} = \sigma_1 + \Delta\sigma, \quad (5)$$

где

$$\sigma_1 = \rho \frac{C_l C_0}{C_l + C_0}, \quad (6)$$

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_1}{t_{sp}} X \left( \frac{1}{C_l} + \frac{1}{C_0} \right). \quad (7)$$

Здесь  $X$  — толщина откольной тарелочки,  $t_{sp}$  — время прохода волны в откольной тарелочке. На рис. 4 представлена зависимость откольной скорости от скорости ударника. Прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что все значения откольного напряжения группируются вокруг следующих трех усредненных по серии опытов значений этой величины:  $\sigma_{sp}^{\min} = 0.76$  ГПа,  $\sigma_{sp}^{md} = 0.98$  ГПа и  $\sigma_{sp}^{\max} = 1.28$  ГПа. Анализ опытных данных показывает, что минимальному значению откольного напряжения  $\sigma_{sp}^{\min}$  соответствуют те опыты, в которых проявился осциллирующий характер взаимодействия

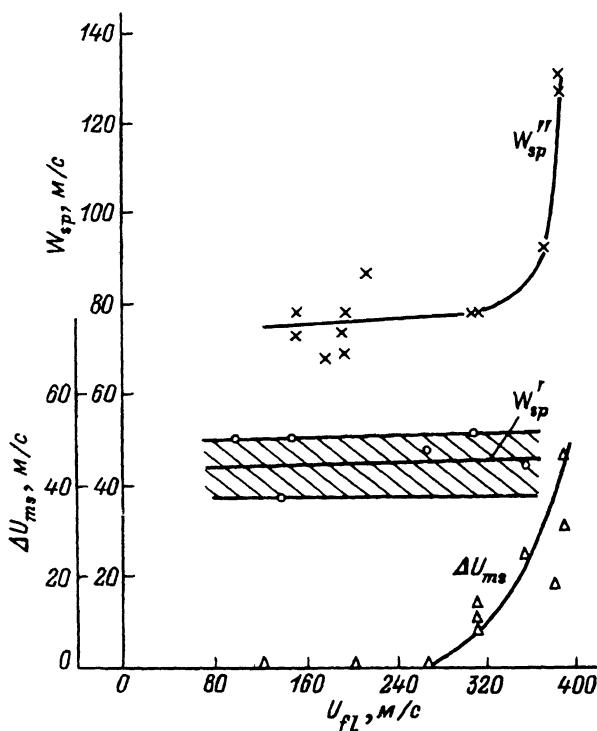


Рис. 4. Зависимости откольной скорости и ширины распределения мезообъемов по скоростям от скорости ударника для стали 28X3СНМВФ.

$W'_{sp}$  — откольная скорость, соответствующая опытам с осцилляциями за фронтом упругого предвестника;  $W''_{sp}$  — то же самое для опытов без осцилляций.

упругого предвестника со структурой материала. Средняя величина откольной прочности для образцов, в которых зарегистрированы осцилляции упруго-пластического течения за фронтом упругого предвестника, оказались почти вдвое меньше той, которая соответствует осциллограммам без осцилляций. Поскольку интерференционный сигнал, как отмечалось выше, соответствует отклику одного суперструктурного элемента среды (а том числе и для сигналов с осцилляциями за фронтом упругого предвестника), то данный результат свидетельствует от том, что резонансные процессы на суперструктурном уровне приводят к резкому снижению локальной прочности материала. Для того диапазона скоростей ударника, в котором проводились настоящие опыты (100–500 м/с), условия резонанса выполняются только для фронта упругого предвестника, который оказался сопоставим с периодом собственных колебаний суперструктурного элемента. Уже это, как видим, приводит к понижению прочности на макроуровне. С увеличением скорости ударника уменьшается также и длительность пластического фронта волны. Это может привести к такой ситуации, когда длительность пластического фронта также станет соизмерима с периодом собственных колебаний суперструктурных элементов материала. Начало этого процесса уже видно для скорости ударника 487 м/с. На интерферограмме, соответствующей этому опыту, наблюдаются слабые осцилляции пластического течения на плато импульса сжатия. Это, по-видимому, явилось причиной весьма низкой величины локальной откольной прочности, совпадающей с теми ее значениями, которые зафиксированы в опытах с осцилляциями за фронтом упругого предвестника. Таким образом, проведенные исследования устанавливают однозначное соответствие снижения локальной откольной прочности с осцилляциями упруго-пластического течения на суперструктурном масштабном уровне.

Обратимся далее к третьей группе значений откольной прочности для стали 283ХСНВМФА. Из рис. 4 видно, что этой группе соответствуют значения откольной прочности, плавно нарастающие от 1.41 до 1.86 ГПа. Для сравнения на этом же рисунке приведена зависимость ширины распределения частиц по скоростям на мезоскопическом масштабном уровне  $\Delta U_{ms} = f(U_{fl})$ . Она измерялась в каждом акте ударного нагружения по методике [6]. Сопоставление двух зависимостей приводит к выводу о том, что между ними имеется вполне определенная корреляция. Видно, что максимальная динамическая прочность соответствует как раз тем опытам, где максимально широким оказалось распределение мезообъемов по скоростям. Подобная корреляция отражает тот факт, что ширина распределения мезообъемов по скоростям (или корень из дисперсии их скорости) характеризует интенсивность релаксационных процессов на мезоуровне. Чем шире распределение мезообъемов по скоростям, тем быстрее протекают эти процессы и гомогенизируется структура материала. Если к моменту реализации тыльного откола структура успевает стать однородной, то материал проявляет максимально возможную для него динамическую прочность. Таким образом, подобно квазистатическим режимам в случае динамического нагружения кинетика мезоскопического структурного уровня определяет реальную макроскопическую прочность материала.



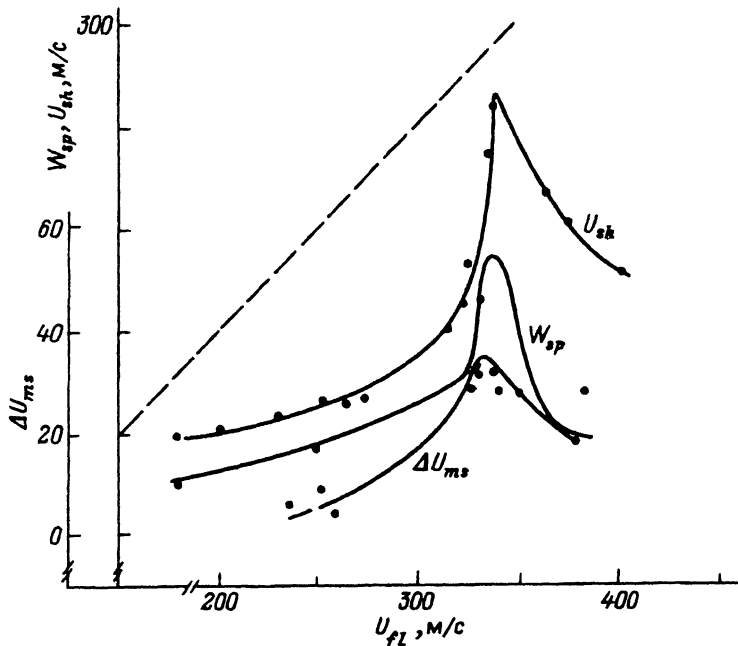


Рис. 5. Зависимости порога устойчивости на сдвиг  $U_{sh}$ , откольной скорости  $W_{sp}$  и ширины распределения мезочастиц по скоростям  $\Delta U_{ms}$  от скорости ударника для стали 38ХНЗМФА.

Таблица 2. Результаты ударных испытаний мишеней из стали 38ХНЗМФА

| Порядковый номер | $h_m$ , мм | $h_{fl}$ , мм | $U_{fl}$ , м/с | $U_{sh}$ , м/с | $W_{sp}$ , м/с | $\Delta U_{ms}$ , м/с | $U_{max}$ , м/с | $U_e$ , м/с |
|------------------|------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1                | 4.27       | 2.11          | 182            | 144            | 140            | 24                    | 174             | 78          |
| 2                | 4.2        | 2.0           | 189            | 75             | 60             | 36                    | 77              | 27          |
| 3                | 4.2        | 2.0           | 196            | 69             | 73             | 36                    | 92              | 19          |
| 4                | 4.27       | 2.11          | 200            | 161            | 159            | 17                    | 179             | 56          |
| 5                | 4.85       | 1.90          | 230            | 171            | 139            | 16.6                  | 176             | 59          |
| 6                | 4.9        | 2.05          | 242            | 177            | 159            | 20                    | 192             | 50          |
| 7                | 4.25       | 2.12          | 252            | 212            | 175            | 15                    | 230             | 56          |
| 8                | 4.26       | 2.15          | 293            | 200            | 180            | 34                    | 63              | 71          |
| 9                | 5.05       | 2.00          | 308            | 264            | 212            | 13.4                  | 281             | 41          |
| 10               | 4.26       | 2.15          | 308            | 290            | 232            | 36                    | 230             | 72          |
| 11               | 4.95       | 2.05          | 300            | 210            | 177            | 26                    | 232             | 34          |
| 12               | 5.0        | 2.0           | 310            | 230            | 175            | 39                    | 245             | 65          |
| 13               | 5.0        | 2.05          | 334            | 250            | 167            | 36.4                  | 267             | 50          |
| 14               | 4.95       | 2.0           | 338            | 239            | 153            | 32                    | 253             | 60          |

2. Сталь 38ХНЗМФА. Зависимости величины порога динамической устойчивости на сдвиг  $\sigma_{sh}$ , откольной прочности  $\sigma_{sp}$  и скоростной дисперсии мезообъемов от скорости ударника представлены на рис. 5 и в табл. 2. Сопоставление этих зависимостей друг с другом вновь указывает на корреляцию между дисперсией скорости мезообъемов, порогом динамической устойчивости на сдвиг и откольной прочностью материала. Все три зависимости для данной стали немонотонны с максимумом в районе скорости ударника 300 м/с. Этот результат также подтверждает вывод о том, что кинетика мезоскопического уровня определяет макроскопическую прочность материала.

Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что для данной стали зависимость  $U_{sh} = f(U_{fl})$  не является прямой линией, сдвинутой относительно диагонали  $U_{sh} = U_{fl}$  на величину упругого предвестника, как это было в случае стали 28ХЗСНМВФА. Для сравнения эта диагональ показана на рис. 5 штриховой линией. Видно, что отличие скорости свободной поверхности, соответствующей порогу динамической устойчивости на сдвиг, от скорости ударника намного больше амплитуды упругого предвестника для стали 38ХНЗМФА ( $\sim 60$  м/с). Это говорит о том, что процессы на плато импульса сжатия здесь определяются иными механизмами, нежели в стали 28ХЗСНМВФА. Отсутствие взаимодействия упругого предвестника, отраженного от свободной поверхности мишени, с набегающим пластическим фронтом здесь обусловлено нестационарностью обоих фронтов. В отличие от стали 28ХЗСНМВФА, где все мишени имели толщину не менее 10 мм, достаточную для того, чтобы упругий предвестник и пластический фронт вышли на стационарное значение, в стали 38ХНЗМФА мишени имели толщину 4–5 мм, что явно недостаточно для его установления в диапазоне скоростей нагружения 100–500 м/с.

Для выяснения механизмов, ответственных за уменьшение скорости свободной поверхности на плато импульса, необходимо рассмотреть релаксационные процессы, протекающие в динамически нагружаемом материале на мезоскопическом и суперструктурном уровнях одновременно. Общая форма реального упруго-пластического импульса сжатия имеет весьма сложную структуру, отдельные элементы которой

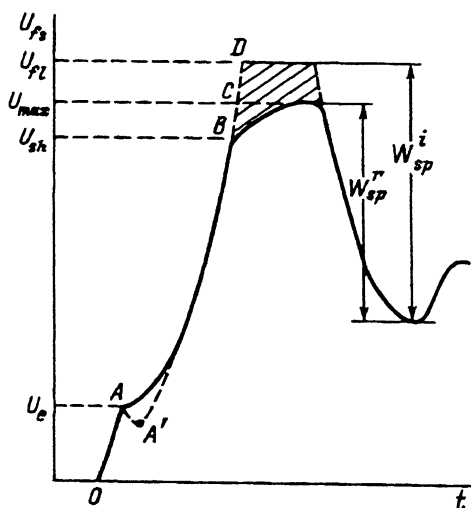


Рис. 6. Временной профиль стандартного упруго-пластического импульса с отколом.

соответствуют разным стадиям динамического деформирования материала. Участок  $OA$  (рис. 6) соответствует упругому отклику материала (так называемый упругий предвестник). В зависимости от типа материала второй участок  $AB$ , соответствующий пластическому фронту волны, может быть либо монотонно возрастающим, если в процессе динамического сжатия имеет место упрочнение материала за фронтом упругого предвестника, либо иметь зуб текучести  $AA'$ , характеризующий склонность материала к релаксации напряжений. Точка  $B$ , в которой происходит изменение наклона верхней части пластического фронта волны, соответствует началу второго релаксационного процесса. Этот процесс протекает в условиях продолжающегося роста динамического напряжения сжатия, вызванного внешним воздействием. Если бы релаксация напряжения на суперструктурном уровне отсутствовала (т.е. не было бы взаимной подвижки суперструктурных элементов), то напряжение на пластическом фронте достигло бы своей максимальной возможной величины, равной скорости ударника  $U_{fl}$ . Результатом этой подвижки является образование полос локализованного сдвига, ориентированных вдоль направления распространения волны [5]. Релаксация напряжения за счет подвижки суперструктурных элементов приводит к тому, что максимальное значение скорости свободной поверхности  $U_{max}$  оказывается несколько меньше, чем  $U_{fl}$ . При этом разность  $U_{rel} = U_{fl} - U_{max}$  определяет величину срелаксированного напряжения и может служить количественной характеристикой релаксационного процесса, протекающего на суперструктурном уровне. Что касается точки излома пластического фронта импульса сжатия  $U_{sh}$ , то она определяет напряжение, которое выдерживают элементы суперструктурного уровня без взаимной подвижки. Чем это напряжение выше, тем выше динамическая прочность материала. Вероятность подвижки суперструктурных элементов относительно друг друга определяется тем, насколько велики между этими элементами локальные напряжения, появившиеся в процессе динамического деформирования материала. Если эти напряжения могут быть устранены за счет релаксационных процессов на мезоуровне, то суперструктурные элементы способны выдержать большие динамические нагрузки без взаимной подвижки, следствием чего является более высокая динамическая прочность материала.

Уменьшение локальных напряжений между суперструктурными элементами при увеличении скоростной дисперсии мезообъемов может быть проиллюстрировано в виде следующей схемы:

$$\begin{array}{l} \Delta U_{ms} \uparrow \rightarrow U_{ms}^{sh} \downarrow \\ \downarrow \Delta U_{ss} \uparrow \rightarrow U_{ss}^{sh} \uparrow \end{array} \quad (8)$$

Эта схема условно показывает, что при увеличении ширины распределения мезообъемов по скоростям  $\Delta U_{ms}$  динамическая устойчивость на сдвиг на мезоуровне  $U_{ms}^{sh}$  уменьшается. В то же время, как сказано выше, увеличение дисперсии на мезоуровне приводит к уменьшению аналогичной величины на суперструктурном уровне. А это в свою очередь свидетельствует о том, что релаксационные процессы на этом уровне затормаживаются, что в итоге приводит к возрастанию порога динамической устойчивости на сдвиг на суперструктурном уровне  $U_{ss}^{sh}$ . Как отмечалось выше, при достижении порогового напряжения

$\sigma_{sh}$  напряжение на пластическом фронте продолжает нарастать из-за того, что, несмотря на наличие релаксационных процессов, скорость нарастания внешнего напряжения остается выше скорости релаксации напряжения. Когда эти скорости сравниваются, напряжение выходит на горизонтальную часть плато импульса. При увеличении скоростной дисперсии на мезоуровне в соответствии со схемой (8) происходит увеличение порога динамической устойчивости на сдвиг на суперструктурном уровне  $U_{sh}^{ss}$ , а также уменьшение разности  $U_{fl} - U_{max}^{ss}$ , характеризующей величину уже срелаксированного напряжения за счет взаимной подвижки суперструктурных элементов. Таким образом, эта разность косвенно характеризует, насколько срелаксировало напряжение на суперструктурном уровне за счет протекания релаксационных процессов на мезоуровне. При этом количественной характеристикой интенсивности релаксационных процессов на мезоуровне является ширина распределения мезообъемов по скоростям.

Представленные на рис. 5 зависимости, снятые для стали 38ХНЗМФА, наглядно подтверждают проведенный выше анализ. Обращает на себя внимание синхронность изменения зависимостей дисперсии скорости на мезоуровне  $\Delta U_{ms}$ , релаксационного напряжения  $U_{rel} = U_{fl} - U_{max}^{ss}$  и откольного напряжения  $\sigma_{sp}$  от скорости ударника. Заметим при этом, что все эти зависимости построены на основе совершенно независимых измерений средней скорости частиц свободной поверхности мишени  $\bar{U}_{fs}$  и ширины распределения частиц по скоростям  $\Delta U_{fs}$ , что свидетельствует о наличии внутренней связи между процессами, определяющими динамическую пластичность и прочность материалов. Эта связь базируется на тесном взаимодействии структурных элементов, относящихся к разным масштабным уровням. В данном случае высокая подвижность элементов мезоскопического уровня определяет стабильность элементов суперструктурного уровня. Тем самым проведенные эксперименты подтверждают высказанное ранее положение о противофазном поведении кинетических и прочностных характеристик материала на соседних масштабных уровнях [11].

Проанализируем с позиции кинетики структурных уровней более детально момент перехода от пластического фронта к плато импульса сжатия на примере ударных нагрузений двух мишеней стали 38ХНЗМФА со скоростью 346 и 300 м/с. На рис. 7 представлены интерферограммы, импульсы средней скорости свободной поверхности мишеней и временные профили дисперсии скорости частиц. Профили средней скорости отличаются прежде всего тем, что в первой мишени переход от пластического фронта к плато импульса осуществляется плавным образом, в то время как во второй мишени этот переход резкий. Обращает на себя внимание также тот факт, что для первой мишени средняя скорость свободной поверхности отличается от скорости ударника всего на 21 м/с, в то время как для второй мишени это отличие составляет 95 м/с. Так как амплитуды упругих предвестников в обоих случаях одинаковы ( $\sim 60$  м/с), то можно сделать заключение, что уменьшение амплитуды импульса на плато не связано с взаимодействием упругого предвестника, отраженного от свободной поверхности, с набегающим пластическим фронтом.

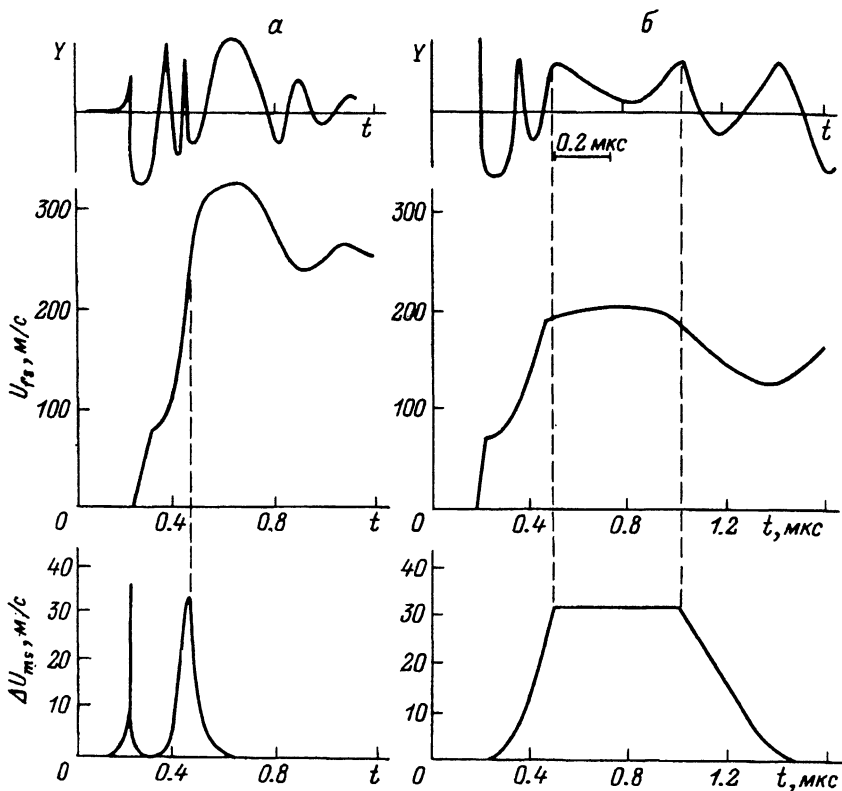


Рис. 7. Интерферограммы, временные профили скорости свободной поверхности и ширины распределения мезочастиц по скоростям для двух мишеней из стали 38ХНЗМФА, нагруженных со скоростью 346 (а) и 300 м/с (б).

С другой стороны, временные профили дисперсии скорости частиц на свободной поверхности в этих опытах также отличаются. Для первой мишени распределение по скоростям на мезоуровне достигает своего максимального значения примерно в середине переднего пластического фронта, а затем и плато импульса оно постепенно сужается до нулевой ширины. При этом на заднем фронте импульса биения интерференционного сигнала с самого начала имеют максимальную амплитуду, что свидетельствует об отсутствии распределения частиц по скоростям. Для второй мишени дисперсия скорости мезообъемов монотонно возрастает вплоть до перехода к плато импульса. Судя по тому, что биения на заднем фронте начинаются с той же амплитуды, что и в конце переднего фронта, на плато импульса сжатия характер распределения не меняется. Затем на заднем фронте дисперсия плавно уменьшается до нуля. Отсюда следует, что распределение мезообъемов по скоростям изменяется только в градиентных силовых полях.

То обстоятельство, что во второй мишени распределение по скоростям на мезоуровне не успело срелаксировать к моменту перехода пластического фронта импульса в плато, привело к накоплению микронапряжений между суперструктурными элементами и, как следствие, к катастрофическому процессу взаимной подвижки суперструктурных

элементов. На временном профиле средней скорости это выглядит в виде резкого перехода от пластического фронта импульса к плато. Иными словами, недостаточная релаксация на мезоуровне привела к релаксации на суперструктурном уровне.

Для первой мишени скорость релаксации микронапряжений на мезоуровне достигает своего максимального значения в середине пластического фронта волны, после чего распределение постепенно сужается, приводя в свою очередь к постепенному увеличению микронапряжений между элементами суперструктурного уровня. Когда последние достигают пороговой величины, здесь также происходит взаимная подвижка суперструктурных элементов относительно друг друга, однако она не носит характера катастрофического процесса. Макроскопически это выглядит как постепенное изменение наклона пластического фронта волны. Другими словами, если дисперсия на мезоуровне уменьшается постепенно, то дисперсия скорости на суперструктурном уровне должна увеличиваться также постепенно. Это в свою очередь обуславливает плавность перехода от пластического фронта к плато импульса.

Проведенные экспериментальные исследования и анализ опытных данных показывают, каким образом тесное взаимодействие и кинетика структурных уровней связаны с динамической пластичностью и прочностью материалов.

### Выводы

1. Ударные испытания сталей 28ХСНЗМВФА и 38ХНЗМФА показали, что динамическая прочность определяется кинетикой элементарных носителей пластической информации на мезоскопическом и суперструктурном масштабных уровнях.
2. Величина дисперсии скорости частиц на каждом структурном уровне определяет интенсивность локальных релаксационных процессов на этом уровне.
3. Динамическое деформирование материала осуществляется в условиях тесного взаимодействия структурных уровней, причем релаксационные и прочностные характеристики материала на соседних уровнях находятся в противофазе.
4. Характер распределения частиц по скоростям на мезоскопическом уровне изменяется только в градиентных силовых полях. На плато импульса сжатия ширина распределения остается неизменной.
5. Встречное взаимодействие пластического фронта и отраженного от свободной поверхности упругого предвестника в случае нестационарных фронтов не приводит к изменению амплитуды пластической волны.
6. Локальные резонансные взаимодействия внутренней структуры материала с импульсным напряжением приводят к резкому снижению динамической прочности материала

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А.И.Чернышенко за участие в опытах, а также А.К.Дивакову за участие в обсуждении результатов и полезную дискуссию.

## Список литературы

- [1] *Владимиров В.И., Иванов В.Н., Приемский Н.Д.* // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. С. 69-80.
  - [2] *Рыбин В.В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
  - [3] *Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев В.Ю.* Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1986.
  - [4] *Владимиров В.И.* // Вопросы теории дефектов в кристаллах. Л.: Наука, 1987. С. 43-56.
  - [5] *Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г., Атрошенко С.А.* // Проблемы прочности. 1990. № 12. С. 19-23.
  - [6] *Мещеряков Ю.И., Диваков А.К., Кудряшов В.Г.* // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24. № 2. С. 126.
  - [7] *Barker L.M.* // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 6. P. 2544-2547.
  - [8] *Атрошенко С.А., Васильков В.Б., Кащенко М.П., Мещеряков Ю.И.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 2. С.
  - [9] *Grady D.E.* // Proc. EXPLOMET-85. New York: M.Dekker. 1985. P. 763-780.
  - [10] *Романченко В.И., Степанов Г.В.* // Журнал прикл. механики и техн. физики. 1980. № 4. С. 141.
  - [11] *Mescheryakov Yu.I., Atroshenko S.A., Vasilkov V.B., Chernyshenko A.I.* // Proc. Intern. Conf. "Shock Compression of Condensed Matter". Elsevier Sci. Publisher, 1992. P. 407-410.
-