

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер, А. А. Баканова и др. ЖЭТФ, 1961, 5.
2. В. М. Титов, Ю. П. Фадеенко. Космические исследования, 1972, 10, 4, 589.
3. Т. М. Платова, П. Е. Хорев, П. В. Макаров. Тр. НИИ ПММ при ТГУ/Под ред. В. А. Шваба, В. Е. Томилова. Вып. 2. Томск.: Изд-во ТГУ, 1973.
4. В. С. Никифоровский, Е. П. Шемякин. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
5. Л. А. Мерзиевский, В. П. Урушкин. ФГВ, 1980, 16, 5, 81.
6. П. Е. Хорев, В. М. Захаров, А. А. Коняев и др.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1980.
7. А. В. Уткин, А. Н. Дремин, А. И. Михайлов и др. ФГВ, 1982, 18, 2, 104.
8. G. R. Johnson. J. Appl. Mechanics, 1977, 6, 771.
9. П. Е. Хорев, В. А. Горельский.— В кн.: Детонация. Матер. II Всесоюз. совещания по детонации. Вып. 2. Черногловка, 1981.
10. Г. В. Стенанов. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наукова думка, 1979.
11. Г. И. Канель, А. И. Дремин. Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1979.
12. Г. И. Канель, В. В. Щербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.

УДК 534.16 : 539.374

О ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

П. В. Макаров, Т. М. Платова, В. А. Скрипняк

(Томск)

При распространении ударных волн в твердых телах идут интенсивные превращения на микроуровне, в результате которых изменяется дефектная структура тел. В подавляющем большинстве моделей, использующих дислокационные представления о механизмах пластического течения, полагается, что затухание упругого предвестника (УП) и деформирование в пластической волне описываются одними и теми же соотношениями, определяющими скорость пластического сдвига [1]. Вследствие этого в расчетах, моделирующих распространение плоской волны, не удавалось правильно количественно описать одновременно и затухание УП, и эволюцию фронта пластической волны [1].

Настоящая работа посвящена построению модели пластического деформирования металлов в ударных волнах, в которой разделены механизмы превращений дефектной структуры в УП, пластической волне нагружения и в волне разгрузки (т. е. учтен определяющий вклад того или иного механизма в формирование различных участков волнового профиля), а также численному моделированию эволюции волновых фронтов с учетом релаксационных процессов.

Известно, что дислокационная модель пластического течения с параметрами, определенными из квазистатических экспериментов, и реальными начальными плотностями дислокаций не позволяет правильно описать эволюцию фронта ударной волны. В связи с этим можно предположить, что во фронте волны действует специфический механизм микроструктурного превращения, который не наблюдается в условиях квазистатического деформирования. Этим механизмом может быть гетерогенное зарождение дислокаций [2, 3].

В данной работе модель, учитывающая возможность увеличения плотности дислокаций за счет гетерогенного зарождения, использовалась в расчетах распространения плоских ударных волн интенсивностью до 10 ГПа в сплавах алюминия: Al-1060, Al-6061-T6, Д-16. Численно решалась система уравнений сохранения совместно с определяющим уравнением релаксационного типа (2)

$$\rho \frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t}, \quad \dot{\varepsilon}_1 = -p + \frac{4}{3} \tau, \quad p = p(\rho), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = 2\mu \left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} - 2 \frac{\partial \gamma^p}{\partial t} \right), \quad (2)$$

где μ — модуль сдвига; p — давление; τ — сдвиговое напряжение. Методика решения и обоснование модели обсуждаются в [4—6].

В основу модели положено соотношение, которое определяет скорость сдвиговой пластической деформации через усредненные значения микропараметров (плотность дефектов и среднюю скорость их коллективного движения v):

$$\dot{\gamma}^p = gbNv, \quad \dot{\gamma}^p = \frac{1}{2}(\dot{\varepsilon}_1^p - \dot{\varepsilon}_2^p), \quad \dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_i^e + \dot{\varepsilon}_i^p \quad (i = 1, 2, 3), \quad \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon}_3 = 0. \quad (3)$$

Здесь $g \cong 0,5$ — ориентационный коэффициент; b — модуль вектора Бюргерса. Модель учитывает историю нагружения через величины кумулятивной пластической деформации γ_k^p и остаточных ориентированных напряжений τ_{bs} , что позволяет проводить расчеты догрузки материала, а в области разгрузки описать неидеальный эффект Баушингера:

$$N = N^* + (N_0 + N' - N^*) \exp(- (A/|g|b) \gamma_k^p), \quad (4)$$

где $\gamma_k^p = \int_0^t |\dot{\gamma}^p| dt$; A — параметр модели. В (4) отражен факт, что возрастание дислокационной плотности в материале ограничено величиной N^* .

Средняя скорость движения дислокаций описывается соотношением

$$v = v_0 \frac{(ST)^2}{1 + (ST)^2} \cdot \text{sign}(\tau - \tau_{bs}), \quad ST = \frac{\tau - \tau'_0}{B}, \quad \tau'_0 = \tau_0 + \tau_{bs}, \quad (5)$$

где v_0 — сдвиговая скорость звука; B — параметр модели; τ'_0 — можно понимать как статический предел текучести деформированного материала, отличающийся от начального значения τ_0 из-за изменения микроструктуры в процессе деформирования. Уровень ориентированных остаточных напряжений определяется соотношением $\tau_{bs} = \alpha \mu b N^{1/2}$.

Повышение плотности дислокаций N' вследствие гетерогенного зарождения происходит за счет собственно зарождения петель некоторого критического радиуса и роста их геометрических размеров

$$N' = \tau - \tau^*/\beta \quad \text{при } \tau > \tau^*, \quad N' = 0 \quad \text{при } \tau \leq \tau^*. \quad (6)$$

Поскольку построение модели, учитывающей кинетику зарождения петель и их расширения, затрудняется недостатком информации об этих процессах, в качестве первого шага здесь применено их усредненное описание. Параметр β определяется концентрацией работающих центров зарождения η и средним радиусом R уже расширившихся петель. Выражение (6) следует из соотношений

$$dN = 2\pi R d\eta, \quad d\eta = K d\tau, \quad \beta = 1/2\pi KR.$$

В модели β определяет скорость затухания УП.

Зарождение дислокаций вызывается локальными сдвиговыми напряжениями, возникающими вследствие неоднородности поля деформаций кристаллической решетки около центров зарождения, которыми могут быть выделения другой фазы, макроскопические и микроскопические включения [2]. Существенно, что первоначальное расширение петель осуществляется под действием этих же напряжений. Поэтому скорость расширения отличается от средней скорости движения дислокаций. Возможно, что расширение петель будет происходить даже при напряжениях, не достаточных для обеспечения движения дислокаций вдали от включения, т. е. меньших статического предела текучести.

Наличие высоких градиентов напряжения во фронте УП и ударной волны способствует зарождению дислокаций при значительно меньших напряжениях, чем те, которые необходимы для этого в квазистатических условиях. Модель такова, что затухание УП заканчивается, когда

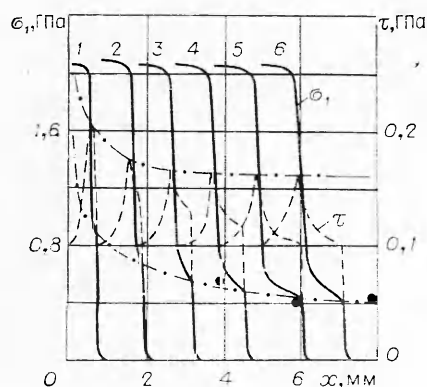


Рис. 1. Эволюция волны напряжения в алюминии Al-6061-T6 (точки — данные работы [10]). Параметры модели: $b = 2,86 \cdot 10^{-10}$ м, $N_0 = 10^{10}$ м $^{-2}$, $N^* = 10^{15}$ м $^{-2}$, $A/|g|b = 0,02$, $v_0 = 3,15 \cdot 10^3$ м/с, $\tau_0 = 0,1$ ГПа, $B = 0,2$ ГПа, $\beta = 10^{-14}$ ГПа/м $^{-2}$, $\alpha = 0,5$, $\tau^* = 0,101$ ГПа.
 t , мкс: 1 — 0,1, 2 — 0,3, 3 — 0,5, 4 — 0,7, 5 — 0,9, 6 — 1,1.

напряжения отрелаксируют до уровня критического напряжения зарождения τ^* , поэтому τ^* может быть определено по амплитуде отрелаксировавшего УП. Параметр β определяется по скорости затухания УП.

В сильно легированных сплавах с большим числом включений при наличии высоких градиентов напряжения уровень τ^* значительно снижается и вызывает уменьшение коэффициента динамичности $\sigma_{дин}/\sigma_{стат}$. Возможно, в некоторых случаях τ^* может быть меньше статического предела текучести, что соответствует $\sigma_{дин}/\sigma_{стат} < 1$. Этот эффект наблюдался на ряде алюминиевых сплавов: Al-6061-T6, Al-2024, Al-1060 [8]. На профиле плоской ударной волны в этих сплавах отсутствует характерный зуб в области УП, который наблюдается в железе и стали [4], где напряжения зарождения, определенные по амплитуде отрелаксировавшего УП, выше статического предела текучести.

Расчеты показывают, что за УП напряжение течения релаксирует до значений τ (этот процесс не связан с зарождением дислокаций), после чего во фронте наблюдается рост напряжения τ , как показано на рис. 1. Максимальное значение τ , которое достигается в эволюционирующем фронте, по мере распространения волны уменьшается. Окончание этого процесса соответствует формированию стационарной волны напряжения. Чрезвычайно важно, что скорость релаксации максимальных сдвиговых напряжений и УП различна, так же как и уровни напряжений, до которых они релаксируют. Вследствие этого невозможно судить о релаксационных процессах во фронте пластической волны по затуханию УП. Численный эксперимент показал, что введение гетерогенного зарождения неравносильно искусственному завышению начальной плотности дислокаций (часто используемому в расчетах) до величин 10^8 см $^{-2}$ для обеспечения экспериментально наблюдаемой скорости затухания УП.

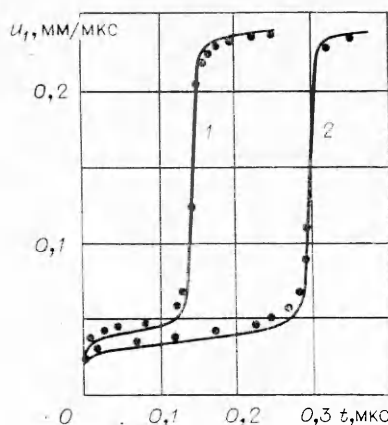


Рис. 2. Скорость свободной поверхности при толщине преграды 6,13 (1) и 12,2 (2) мм. Скорость удара $v_0 = 480$ м/с.

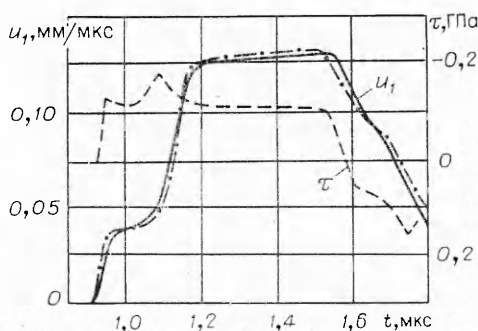


Рис. 3. Профиль волны и величины τ . Толщина преграды из Al-6061-T6 6,3 мм (штрихпунктирная линия — эксперимент [11]).

При распространении ударных волн возможно зарождение дислокаций во фронте пластической волны. Расчеты показывают, что максимальная плотность дислокаций создается вблизи поверхности удара, и с ростом расстояния от нее убывает до некоторого значения, зависящего от интенсивности удара.

Гетерогенное зарождение играет существенную роль в развитии пластического течения в ударной волне, но не является механизмом, определяющим формирование фронта пластической волны, как это предполагается в модели Майерса [9]. Так, при использовании только одного механизма зарождения для описания увеличения плотности дефектов были получены низкоградиентные фронты плоских волн с осцилляциями.

На рис. 2 приведены рассчитанные скорости свободной поверхности в Al-6061-T6 в сравнении с экспериментами [10]. Полный волновой профиль и поведение напряжения τ приведены на рис. 3. В области волны разгрузки ярко выражен эффект Баушингера.

Таким образом, численное воспроизведение экспериментальных волновых профилей в рамках рассмотренной модели показало, что затухание УП определяется в основном процессом зарождения дислокаций. В формировании и эволюции фронта пластической волны определяющую роль играет процесс размножения дислокаций. Структура волн разгрузки существенно связана с величиной накопленных пластических деформаций и уровнем ориентированных остаточных напряжений τ_{bs} .

ЛИТЕРАТУРА

1. R. J. Clifton.— In: Mechanical Properties at High Rates Strain. Bristol — London, 1980.
2. J. R. Asay, G. R. Fowles, G. E. Duvall et al. J. Appl. Phys., 1972, 43, 5, 2132.
3. М. А. Могилевский, И. О. Мынкин. ФГВ, 1978, 14, 5, 159.
4. П. В. Макаров, В. А. Скрипняк. Деп. ВИНТИ № 394—82, 1982.
5. П. В. Макаров, Т. М. Платова, В. А. Скрипняк. Матер. V Всесоюз. съезда механиков. Алма-Ата, 1980.
6. P. V. Makarov, T. M. Skripnyak. Abstracts IUTAM Symposium "Nonlinear deformation wave", Tallin, 1982.
7. Р. Хоникомб. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972.
8. А. Ф. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
9. M. A. Meyers. Scr. Met., 1978, 12, 1, 21.
10. J. N. Johnson, L. M. Barker. J. Appl. Phys., 1969, 40, 4321.
11. J. Lipkin, J. R. Asay. J. Appl. Phys., 1977, 48, 182.

УДК 518.12 : 539.4.019

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ ЧАСТИЦЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ НАПЫЛЕНИИ

С. Н. Буравова
(Черноголовка)

Аналитическое рассмотрение удара частицы с поверхностью в основном связано с поиском автомодельных решений [1, 2], которые относятся к точечному размеру частиц и не отражают особенности течения за фронтом ударной волны в непосредственной близости от момента удара. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе относится к области скоростей в десятки километров в секунду, что более чем на порядок превышает диапазон скоростей, имеющих место при детонационном напылении. Поэтому представляет интерес анализ явлений, происходящих при ударе частицы конечного размера в диапазоне сравнительно небольших скоростей.