

УВ на стенку и полного установления токов (режим многократного сжатия). В ходе решения задачи найдены значения параметров системы шунт — образец, при которых скин-эффект мал. Оценки предельной проводимости для режима однократного сжатия следующие: $4 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для слабосжимаемых веществ типа металлов и $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для вещества с $u/D = 0,5$. Режим многократного сжатия позволяет существенно поднять верхний предел измеряемой проводимости: $10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для слабосжимаемого вещества и $3 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для вещества с $u/D = 0,5$. Проведенный анализ показал, что возможно измерение σ в УВ соответствующей проводимости обычных металлов. Предложенная методика в значительной мере решает давнюю проблему измерения высокой проводимости вещества при фазовых переходах диэлектрик — металл в УВ.

Авторы выражают благодарность Е. И. Биченкову за советы и поддержку при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдер Б. Физические эксперименты с сильными ударными волнами // Твердые тела под высоким давлением. — М.: Мир, 1966.
2. Styris D. L., Duvall G. E. Electrical conductivity of materials under shock compression // High Temperatures — High Pressures. — 1970. — V. 2, N 5.
3. Килер Р. Электропроводность конденсированных сред при высоких давлениях // Физика высоких плотностей энергии. — М.: Мир, 1974.
4. Якушев В. В. Электрические измерения в динамическом эксперименте // ФГВ. — 1978. — № 2.
5. Куленова Л. В. Электропроводность нитрида бора, хлористого калия и фторопласта-4 за фронтом ударных волн // ФТТ. — 1969. — Т. 11, вып. 5.
6. Набатов С. С., Дремин А. Н. и др. Измерение электропроводности серы при динамическом сжатии до 400 кбар // Письма в ЖТФ. — 1979. — Т. 5, вып. 3.
7. Набатов С. С., Дремин А. Н. и др. Измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях // Письма в ЖЭТФ. — 1979. — Т. 29, вып. 7.
8. Постнов В. П., Ананьева Л. А. и др. Электропроводность и сжимаемость серы при ударном сжатии // ФГВ. — 1986. — № 4.
9. Mashimo T., Kimura Y., Nagayama K. Precise measurement of the electrical conductivity of silicon under shock compression. — Kumamoto University, 1984.
10. Гатиллов Л. А., Куленова Л. В. Измерение высокой электропроводности в ударно-сжатых диэлектриках // ПМТФ. — 1981. — № 1.
11. Гатиллов Л. А., Куленова Л. В. Электропроводность подцистого цезия за фронтом ударной волны при давлениях до 100 ГПа // ФТТ. — 1981. — Т. 23, вып. 9.
12. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. и др. Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // ПМТФ. — 1981. — № 2.
13. Физика взрыва/Под ред. Г. П. Станюковича. — М.: Наука, 1975.
14. Nagayama K., Mashimo T. Magnetohydrodynamic study of flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in semiconductors // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. — М.: Наука, 1984.
15. Compendium of shock wave data/Ed. M. van Thiel. — Livermore, 1966.
16. Goto T., Sato T., Syono Y. Reduction of shear strength and phase-transition in shock-loaded silicon // Jap. J. Appl. Phys. — 1982. — V. 21, N 6.
17. Bundy F. P. Phase diagrams of silicon and germanium to 200 kbar, 1000 °C // J. Chem. Phys. — 1964. — V. 41, N 12.
18. Павловский М. П. Образование металлических модификаций германия и кремния в условиях ударного сжатия // ФТТ. — 1967. — Т. 9, вып. 11.
19. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. — М.: Наука, 1979.
20. Глазов В. М., Чижевская С. Н., Глаголева И. П. Жидкие полупроводники. — М.: Наука, 1967.

Поступила 23/IX 1987 г.

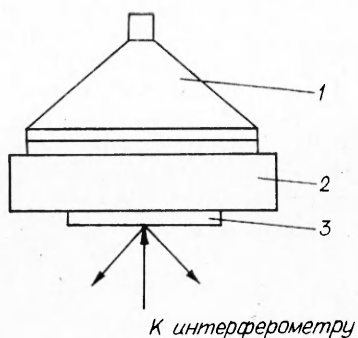
УДК 532.593

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ АЛЮМИНИЯ В ВОЛНАХ РАЗРЕЖЕНИЯ

Г. И. Канель, С. В. Разоренов, В. Е. Фортвов

(Черноголовка)

Ранее показано [1—3], что в ударно-сжатых металлах догрузочные волны сжатия, как и волны разрежения, имеют упругие предвестники. Анализ хода изменения состояния в следующих за ударной волной (УВ) волнах сжатия и разрежения показал, что приращенная девиаторных на-



Р и с. 1

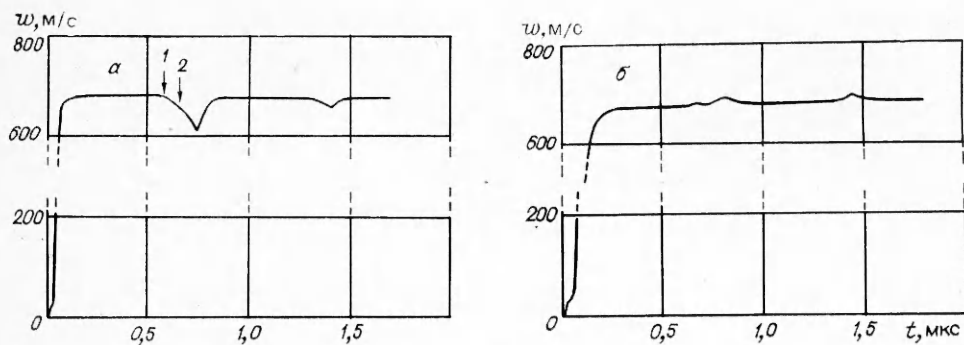
пряжений в них могут значительно превышать анизотропию напряжений за фронтом УВ. Такая ситуация не согласуется с простыми моделями упругопластического тела, согласно которым приращение деформации в пластической области связано с незначительным или даже нулевым приращением девиаторных напряжений, а соответствующая скорость распространения слабых догрузочных волн близка к «объемной» скорости звука $c_b = (\partial p / \partial \rho)_s^{1/2}$. При обсуждении особенности напряженно-деформируемых состояний и их изменений за фронтом УВ в металлах объяснялись процессами релаксации напряжений [1, 4, 5] или спецификой высокоскоростной деформации металлов в УВ [3], заключающейся в разогреве плоскостей скольжения, который приводит к кратковременной значительной потере сдвиговой прочности материала. В последнем случае сопротивление деформированию восстанавливается по мере выравнивания температуры за фронтом УВ и практически не зависит от скорости деформирования.

В упруговязкой среде типа Максвелла слабые возмущения независимо от их знака после выдержки образца при фиксированной деформации должны распространяться как чисто упругие волны со скоростью $c_l = \sqrt{(K + (4/3)G)/\rho}$. В частности, и при ступенчатом разрежении скорость фронта догрузочной волны должна быть равна c_l . Если же процессы релаксации напряжений несущественны, то выдержка не должна влиять на ход пластического деформирования.

В данной работе проведена регистрация волны растяжения в разгруженном после ударного сжатия алюминии. Схема опытов показана на рис. 1. Плоская УВ с приблизительно прямоугольным профилем давления, возбуждаемая взрывным генератором 1, вводилась в алюминиевый АД1 образец 3 толщиной 2 мм через массивный медный экран 2. Непрерывная регистрация скорости движения свободной тыльной поверхности образца осуществлялась лазерным доплеровским интерферометром [6]. Давление ударного сжатия в алюминии составляло 5,3 ГПа.

Ступенчатое разрежение в ударно-сжатом алюминиевом образце организовывалось в результате отражений волн от свободной тыльной поверхности образца и затем от поверхности контакта образца с экраном. В волне разгрузки, образующейся при отражении УВ от свободной поверхности, давление падает до нуля. Из-за различия динамических импедансов алюминиевого образца и медного экрана на контактной поверхности волна разгрузки преломляется. Отражение волны от границы раздела с более жесткой средой происходит с сохранением знака нагрузки, поэтому в разгруженном образце образуется волна растяжения, распространяющаяся от экрана к тыльной поверхности образца. Таким образом, образец после ударного сжатия претерпевает ступенчатое разрежение — сначала в волне разгрузки, затем, после паузы, в волне растяжения. На контактной поверхности отсутствует сопротивление растяжению, поэтому процесс отражения волны разгрузки у этой поверхности завершается возвратом давления к нулю. В результате образуется короткий импульс растяжения, который претерпевает многократные отражения между поверхностями образца. Если интенсивность ударного сжатия достаточно велика, вблизи контактной поверхности возможно разрушение образца.

Полученный из измерений профиль скорости тыльной поверхности образца $w(t)$ показан на рис. 2, а. Видны все особенности волнового процесса: фиксируется выход на поверхность упругопластической волны сжатия и затем, после паузы, — выход импульса растяжения. Стрелками отмечены расчетные моменты выхода на поверхность фронта импульса растяжения в предположении, что скорость его распространения равна продоль-



Р и с. 2

ной 1 или объемной 2 скорости звука. В обоих случаях скорость фронта волны разгрузки предполагалась равной продольной скорости звука в ударно-сжатом веществе, величина которой рассчитывалась в предположении постоянства коэффициента Пуассона. При этом для нулевого давления объемная скорость звука в алюминии принималась равной 5,25 км/с, продольная — 6,4 км/с. Их зависимости от давления p рассчитывались в виде [7]

$$c_b(p) = V/V_0 \sqrt{c_0^2 + 4bp/\rho_0}, \quad c_l(p) = (c_l/c_0) c_b(p),$$

где $c_0 = 5,25$ км/с, $b = 1,39$ — коэффициенты линейного выражения для ударной адиабаты ($D = c_0 + bu$); V — удельный объем; ρ_0 — начальная плотность. Результаты измерений показывают, что фронт импульса растяжения распространяется со скоростью, близкой к c_l . Иными словами, при ступенчатом разрежении ударно-сжатого алюминия слабые возмущения после выдержки материала при фиксированной деформации имеют чисто упругий характер.

Значения растягивающих напряжений вблизи контактной поверхности в данном случае достигали 0,75 ГПа, что достаточно для инициирования откольного разрушения [8]. Подобная схема нагружения используется для низкоскоростного взрывного метания ударников в исследовательских целях [8]. При этом важно не допустить разрушения ударника. На рис. 2, б представлен профиль скорости поверхности алюминиевой пластины, полученный в несколько измененной постановке, когда между ней и медным экраном проложена полиэтиленовая пленка толщиной 0,2 мм. В этом случае режим отражения волны разгрузки изменяется. При отражении от менее жесткой прослойки образуется короткий импульс сжатия. Скорость его фронта также равна продольной скорости звука. Отметим, что первая пластическая волна сжатия в данном случае имеет в момент выхода на поверхность значительно большую ширину, чем в опыте без прокладки (~ 120 и 15 нс соответственно).

Таким образом, эксперименты со ступенчатым разрежением в ударно-сжатом алюминии подтверждают релаксационный характер деформирования. Показано, что тонкая прокладка из материала с малой динамической жесткостью меняет режим отражения волн на контактной поверхности и снимает опасность разрушения ударника при его метании УВ.

Авторы благодарят Л. Г. Ермолова и Ю. П. Конаныхина за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Канель Г. И. Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах // ПМТФ. — 1976. — № 2.
2. Lipkin J., Asay J. R. Reshock and release of shock-compressed 6061-T6 aluminium // J. Appl. Phys. — 1977. — V. 48, N 1.
3. Asay J. R., Chhabildas L. C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminium // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. — N. Y., 1981.

4. Канель Г. И. Модель кинетики пластической деформации металлов в условиях ударно-волнового нагружения // ПМТФ.— 1982.— № 2.
5. Макаров П. В. Упругопластическое деформирование металлов волнами напряжений и эволюция дефектной структуры // ФГВ.— 1987.— № 1.
6. Asay J. R., Barker L. M. Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity // J. Appl. Phys.— 1974.— V. 45, N 6.
7. Воробьев А. А., Дремин А. Н., Канель Г. И. Зависимость коэффициентов упругости алюминия от степени сжатия в ударной волне // ПМТФ.— 1974.— № 5.
8. Канель Г. И., Разоренов С. В., Фортгов В. Е. Кинетика разрушения алюминиевого сплава АМг6М в условиях откола // ПМТФ.— 1984.— № 5.

Поступила 23/IX 1987 г.

УДК 532.526

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

С. А. Гапонов, В. И. Лысенко

(Новосибирск)

Проблема перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный требует изучения развития малых возмущений. В экспериментальном плане для этих целей широко используются термоанемометры с ниточными датчиками, помещенными внутрь пограничного слоя, как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях. В случае больших сверхзвуковых скоростей использование проволочных датчиков в потоке затрудняется несколькими обстоятельствами: высокой температурой торможения, относительно высокой загрязненностью потока, относительно большим скоростным напором и др. Кажется предпочтительным в этих условиях изучение развития волн непосредственно на поверхности модели. В качестве приемников возмущений могут использоваться пленочные термоанемометрические датчики (например, для замера касательных напряжений) и датчики давлений, применяемые в исследованиях турбулентных пограничных слоев. Известна работа [1], в которой датчиками давления зафиксированы неустойчивые волны в ламинарном сверхзвуковом пограничном слое.

С точки зрения теории устойчивости параллельных течений параметры волны, полученные по результатам измерений внутри пограничного слоя и на поверхности, должны совпадать. И в этом отношении степень усиления возмущений может измеряться датчиком любого типа с достаточными чувствительностью и разрешением. Например, можно попытаться измерить эту величину ниточным датчиком, помещенным на поверхности модели. К сожалению, ввиду непараллельности течения в пограничном слое параметры волны на различных расстояниях от поверхности различны. В [2] приводится полная информация по развитию возмущений массового расхода, но не дается представления о поведении колебаний других параметров, тем более на поверхности пластины.

В данной работе теоретически изучено развитие в пограничном слое возмущений всех основных параметров течения. Результаты расчетов степеней усиления градиента массового расхода, градиента температуры и давления на поверхности пластины сопоставляются с экспериментальными данными, полученными проволочными термоанемометрическими датчиками, расположенными на поверхности модели.

1. Метод расчета развития возмущений на основе линеаризованных уравнений Навье — Стокса с учетом слабой непараллельности основного течения описан в [3]. В соответствии с теорией устойчивости слабопараллельных течений зависимость возмущения от безразмерных координат и времени принималась в виде

$$(1.1) \quad Q_k(\bar{x}, \bar{y}) = A(\bar{x}) q_k(\epsilon \bar{x}, \bar{y}) \exp \left[i \left(\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}} \alpha(\xi) d\xi + \beta \bar{z} - \omega t \right) \right].$$

Здесь $A(\bar{x})$ — амплитуда; q_k — собственная функция теории устойчивости локально-параллельных течений, параметрически зависящая от продольной координаты \bar{x} ; ϵ — малый параметр, характеризующий непараллельность течения; α , β — волновые числа; ω — круговая частота. Вектор-функция q_k нормирована таким образом, чтобы максимальные напряжения трения в плоскости (\bar{x}, \bar{z}) не зависели от \bar{x} . Пространственные координаты обезразмеривались по $\delta = \sqrt{\chi \nu_e / u_e}$, а время — по $\tau_1 = \delta / u_e$ (индексом e 70