

Следует обратить внимание на особенность исследуемого класса задач: при теплообмене смешанной конвекцией однофазной жидкости около гладкой пластины единственный параметр конвекции — отношение Gr/Re^2 [5]. Для пластины в зернистом слое при максимальном отклонении от закона Дарси имеем контрольный параметр Gr_b/Re_b^2 , в случае же сопоставимого вклада линейного и квадратичного членов в уравнение (1) таким параметром является Gr_b/Re_b . Отметим также, что для зернистых слоев численные значения Gr/Re (контрольный параметр для линейного закона фильтрации, $Gr = g\beta\Delta T \Pi x/\nu^2$, $Re = u\sqrt{\Pi}/\nu$) и Gr_b/Re_b (при отклонении от линейного закона) тождественно равны. Это приводит к возможности использования, как отмечалось выше, асимптотики свободной конвекции, аналогичной асимптотике смешанной конвекции в условиях линейной фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheng P. Heat transfer in geothermal systems // *Advances in Heat Transfer*.— N. Y.: Acad. Press, 1978.— V. 14.
2. Fand R. M., Steinberger T. E., Cheng P. Natural convection heat transfer from a horizontal cylinder embedded in a porous medium // *Intern. J. Heat Mass Transfer*.— 1986.— V. 29, N 1.
3. Bejan A., Poulikakos D. The non-Darcy regime for vertical boundary layer natural convection in a porous medium // *Intern. J. Heat Mass Transfer*.— 1984.— V. 27, N 5.
4. Plumb O. A., Huenefeld J. C. Non-Darcy natural convection from heated surfaces in saturated porous media // *Intern. J. Heat Mass Transfer*.— 1981.— V. 24, N 4.
5. Sparrow E. M., Eichhorn R., Gregg J. L. Combined forced and free convection in a boundary layer flow // *Phys. Fluids*.— 1959.— V. 2, N 3.
6. Cheng P. Combined free and forced convection flow about inclined surfaces in porous media // *Intern. J. Heat Mass Transfer*.— 1977.— V. 20, N 8.

Поступила 28/VII 1986 г.

УДК 532.593; 539.172.16

ПЛАВЛЕНИЕ СВИНЦА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Ю. В. Батюков, В. Н. Герман, Р. С. Осипов,
С. А. Новиков, В. А. Цыганов

(Москва)

Переход твердого вещества при ударно-волновом сжатии в жидкую фазу (как и любой фазовый переход при ударном сжатии) происходит в некотором интервале давлений, соответствующем участку ударной адиабаты смеси двух фаз. Схемы возникающих при этом течений рассматривались, например, в [1, 2] для фазового перехода, сопровождающегося уменьшением объема, в [3] для плавления. В [3] отмечалось, что факт плавления вещества в ударной волне (УВ) не может быть зарегистрирован с помощью известных экспериментальных методов, основанных на измерении волновых и массовых скоростей, так как изменение параметров вещества при плавлении весьма мало. В известных экспериментах выводы о факте плавления в УВ делались на основании изменений вязкости металлов за фронтом волны [4] и при изучении с помощью импульсного рентгенографирования характера движения свободной поверхности образца при ударе [3].

В данной работе представлены экспериментальные результаты о плавлении свинца в УВ, полученные двумя независимыми методами: изучением зависимости динамического предела текучести Y_d от амплитуды напряжения σ_x одномерного ударно-волнового сжатия и микроструктурных изменений в сохраненных после ударно-волнового нагружения образцах.

С помощью проволоочных манганиновых датчиков напряжения, расположенных в двух взаимно перпендикулярных сечениях исследуемого образца, проведены прямые измерения продольной σ_x и поперечной σ_y составляющих напряжения ударного сжатия в диапазоне 2,0—26 ГПа. Разность этих напряжений в условиях одномерного деформирования определяет значение динамического предела текучести ($Y_d = \sigma_x - \sigma_y$), при достижении которого за фронтом плоской УВ происходит переход из упругого в пластическое состояние. С повышением напряжения ударного сжа-

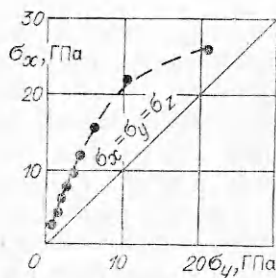


Рис. 1

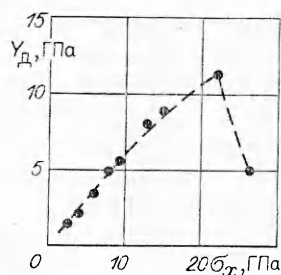


Рис. 2

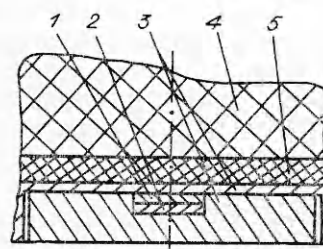


Рис. 3

тия σ_x увеличивается температура вещества за фронтом УВ. Действие этих двух факторов (напряжения и температуры) на Y_d , характеризующий сопротивление материала деформированию при ударно-волновом сжатии, прямо противоположно.

Очевидно, что в области напряжений σ_x , при которых происходит плавление, значение Y_d должно уменьшаться, практически стремясь к нулю при полном переходе вещества в жидкую фазу. Методика экспериментов подробно описана в [5]. Для создания в образцах свинца С4 плоских стационарных УВ различной амплитуды применялись взрывные устройства, обеспечивающие в экранах из меди и алюминия волну столбовидного профиля длительностью 1—3 мкс (см., например, [6]). Результаты экспериментов, представленные на рис. 1, 2 в координатах $\sigma_x - \sigma_y$, $Y_d - \sigma_x$ соответственно, свидетельствуют о том, что напряженное состояние свинца за фронтом плоской УВ отличается от состояния всестороннего гидростатического сжатия: отношение среднего напряжения $\sigma_0 = (\sigma_x + 2\sigma_y)/3$ к напряжению ударного сжатия σ_x составляет $\sim 0,6$ и практически постоянно в диапазоне 2,0—20 ГПа.

Динамический предел текучести линейно растет в диапазоне напряжений σ_x до ~ 22 ГПа, после чего происходит его резкое уменьшение (от 12 ГПа при $\sigma_x = 22$ ГПа до 5 ГПа при $\sigma_x = 26$ ГПа) (рис. 2). Линейная экстраполяция нисходящей ветви зависимости $Y_d(\sigma_x)$ к $Y_d = 0$ дает $\sigma_x \approx 30$ ГПа. Из представленных на рис. 1, 2 экспериментальных данных следует, что полный переход свинца в жидкую фазу, для которой $Y_d \approx 0$, происходит при напряжениях, больших 30 ГПа. Можно предположить, что резкое уменьшение Y_d при $\sigma_x > 22$ ГПа связано с началом плавления свинца за фронтом плоской УВ.

Для определения факта плавления металла при ударно-волновом сжатии производилось нагружение составного образца, состоящего из исследуемого металла и более легкоплавкого, являющегося индикатором плавления, способного образовывать с металлом твердые растворы или интерметаллические соединения [7]. Если при нагружении происходит плавление металла, то жидкая фаза, перемешиваясь с заведомо расплавленным металлом-индикатором, образует расплав, который при снятии нагрузки выкристаллизовывается в одну из промежуточных фаз интерметаллида или твердого раствора. Выявление с помощью микроструктурного метода (металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический анализы) таких соединений, полученных в результате динамического нагружения, однозначно указывает на факт плавления металла. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3. Образец, состоящий из двух плотно прижатых дисков (изучаемый металл 1 и металл-индикатор 2), заключался в специальную ампулу сохранения 3 и нагружался плоской УВ заданной интенсивности, возбуждаемой при подрыве заряда взрывчатого вещества 4 через демпфирующую прокладку 5. Варьирование напряжением ударного сжатия осуществлялось изменением толщины заряда и демпфера.

В серии экспериментов производилось последовательное увеличение напряжения σ_x от опыта к опыту через 1—2 ГПа в интервале 18,5—22 ГПа. В качестве индикатора плавления свинца использовался висмут. После

каждого нагружения сохраненный образец подвергался микроструктурным исследованиям в стационарных условиях. Результаты изучения микроструктурных изменений однозначно показали, что, начиная с напряжения 20,5 ГПа (при начальной температуре образца $\sim 10^\circ\text{C}$), происходит образование твердого раствора свинца и висмута. Кристаллическая решетка соединения гексагональная, плотноупакованная с параметрами $a = 3,5 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 5,79 \cdot 10^{-10}$ м.

Твердый раствор с соответствующей кристаллической решеткой назван в [8] ε -фазой. Для сравнения: свинец-кубическая гранецентрированная решетка с $a = 4,939 \cdot 10^{-10}$ м, висмут-ромбическая решетка с $a = 4,736 \cdot 10^{-10}$ м, $\alpha = 57^\circ 14'$. Образование в результате ударно-волнового нагружения твердого раствора свинца и висмута свидетельствует о плавлении свинца за фронтом УВ.

Полученные в настоящей работе двумя независимыми методами результаты подтверждают и дополняют друг друга. Так, совпадение величин напряжения ударного сжатия σ_x на фронте УВ, при которой происходит резкое изменение зависимости $Y_d = Y_d(\sigma_x)$ и наблюдаются структурные изменения, свидетельствующие о плавлении свинца, подтверждает предположение, что максимум зависимости $Y_d(\sigma_x)$ соответствует точке плавления, а также то, что плавление свинца происходит именно в УВ, а не при его разгрузке.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными [3], где отмечено, что плавление свинца в УВ возникает при напряжениях 23—25 ГПа. По результатам [9] плавление свинца предполагается в диапазоне напряжений 27—33 ГПа. В [10] показано, что при напряжениях 40 ГПа свинец за фронтом УВ уже находится в расплавленном состоянии, что подтверждает расчетные оценки [11].

Таким образом, можно утверждать, что интервал напряжений ударного сжатия, в котором происходит плавление свинца в УВ, составляет 20—30 ГПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wackerly J. Shock-wave compression of quartz // J. Appl. Phys.— 1962.— V. 33, N 3.
2. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование структуры ударных волн сжатия в железе и стали // ЖЭТФ.— 1964.— Т. 47, вып. 3(9).
3. Беляков Л. В., Валицкий В. П. и др. О плавлении свинца в ударной волне // ДАН СССР.— 1966.— Т. 170, № 3.
4. Минеев В. Н., Савинов Е. В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии // ЖЭТФ.— 1967.— Т. 52, вып. 3.
5. Батьков Ю. В., Новиков С. А. и др. Исследование сдвиговых напряжений в металлах на фронте ударной волны // Пробл. прочности.— 1981.— № 5.
6. Павловский М. Н. Электросопротивление ударно-сжатого иттербия // ЖЭТФ.— 1977.— Т. 73, вып. 1 (7).
7. А. с. 951131 СССР. Способ определения фазовых превращений в твердом теле / В. Н. Герман, Р. С. Осипов, В. А. Цыганов.— Оpubл. в БИ, 1980, № 30.
8. Самсонов Г. В., Абдусалымова М. Н., Черногоренко В. Б. Висмутиды.— Киев: Наук. думка, 1977.
9. Гатилов Л. А. Электросопротивление ударно-сжатого свинца // Физика импульсных давлений.— М.: ВНИИФТРИ, 1979.— Вып. 44(74).
10. Новиков С. А., Силицына Л. М. О влиянии давления ударного сжатия на величину критических напряжений сдвига в металлах // ПМТФ.— 1970.— № 6.
11. Урлин В. Д. Плавление при сверхвысоких давлениях, полученных в ударной волне // ЖЭТФ.— 1965.— Т. 49, вып. 2(8).

Поступила 28/X 1986 г.