

Нагружение ударными волнами выявило в меди условия реализации деформации двойникованием и позволило наблюдать развитие трещин от систем пересекающихся двойников, а также установить влияние неоднородностей в металле на его разрушение при взрывном нагружении.

Поступила в редакцию
16/1 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Жаров, М. С. Михалев и др. ФММ, 1971, 31, 1069.
2. М. А. Могилевский. ФГВ, 1970, 6, 2, 224.
3. E. G. Zukas. Metals Eng. Quart., ASM, May, 1966.
4. A. R. Stokes. Proc. Phys. Society, 1948, 61, 621.
5. Л. И. Миркин, Я. С. Уманский. ФММ, 1960, 9, 897.
6. C. S. Smith. Trans. AIME, 1958, 212, 574.

УДК 621.787

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СОУДАРЯЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ

И. В. Яковлев

(Новосибирск)

При исследовании плоских или близких к плоским соударений двух металлических пластин особый интерес вызвало соударение свинцовых пластин с пластинами из различных металлов. Скорость метания свинцовой пластины составляла примерно 500 м/с. При этом после соударения поверхность пластины, на которую метался свинец, имела вид, изображенный на рис. 1. Видно, что поверхность покрыта характерными «выплесками» металла.

Можно было предположить, что с поверхности свинца в результате откола, который происходит при выходе ударной волны на эту поверхность, вылетают частицы свинца со скоростью, большей скорости полета самой пластины, и образуют на поверхности пластины, на которую метается свинец, кратеры, а затем эти кратеры после соударения с пластиной свинца работают как кумулятивные выемки. Однако создание заранее на поверхности неподвижной пластины таких кратеров показало совершенно иной характер возмущения поверхности соударения. Это побудило искать иную причину возникновения такой поверхности.

Рассмотрим состояние, в котором находится граница раздела соударяющихся металлов. В условиях высокоскоростного соударения двух металлических пластин определенная доля энергии уходит на интенсивную деформацию соударяющихся поверхностей [1].

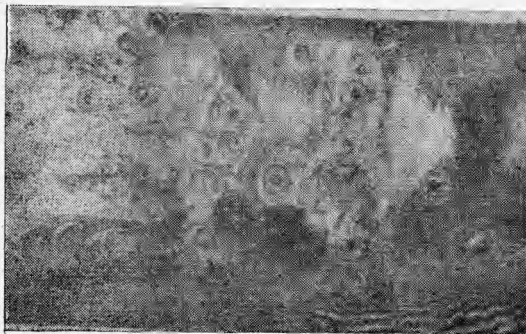


Рис. 1.

При этом происходит значительное выделение тепла, приводящее либо к оплавлению соударяющихся поверхностей металлов, либо к значительному увеличению пластичности приграничных (относительно поверхности соударения) областей. Свидетельством этого является наличие в сварном шве расплавов, если соударение осуществляется в режиме сварки взрывом. Увеличение скорости соударения обычно приводит к увеличению количества расплавов. Этот факт для режимов сварки взрывом исследован в работе [2].

Таким образом, в рассматриваемых случаях соударения свинцовой пластины с пластиной другого металла естественно считать, что в некоторый момент соударения имеется область свинца вблизи поверхности контакта и соответствующая область другого металла, находящиеся в некотором «псевдожидком состоянии». Это означает, что напряжения в обоих металлах превышают динамический предел упругости и эти материалы способны пластически деформироваться. В подобном состоянии соударяющиеся поверхности могут находиться в течение времени порядка 5—10 мкс [2].

Можно предположить, что прежде, чем наступит затвердевание вблизи первоначально гладкой границы раздела, могут возникнуть условия, при которых последняя потеряет устойчивость. Вид поверхности соударения позволяет предположить, что в данном случае как раз и происходит подобная потеря устойчивости границы раздела.

Явление неустойчивости границы раздела между двумя жидкостями рассмотрено Тэйлором в работе [3].

В работе рассматривается граница раздела между двумя тяжелыми жидкостями с плотностями ρ_1 и ρ_2 , которые ускоряются вертикально вверх с ускорением g_1 . Если система координат фиксирована по отношению к границе раздела, то для жидкостей, достаточно глубоких (по сравнению с длиной волны возмущения на границе раздела), потенциалы скорости движения могут быть записаны в следующем виде: для верхней жидкости

$$\Phi_1 = Ae^{-ky+nt} \cos kx; \quad (1)$$

для нижней жидкости

$$\Phi_2 = -Ae^{ky+nt} \cos kx, \quad (2)$$

где A , n , k — произвольные постоянные. В этом случае уравнение поверхности раздела примет вид:

$$\eta = Akn^{-1}e^{nt} \cos kx. \quad (3)$$

При этом давление в верхней жидкости в пренебрежении квадратами скорости возмущения

$$P_1 = P - (g + g_1)\rho_1 y + \rho_1 \Phi_1,$$

где P — среднее давление на поверхности раздела; g — ускорение гравитации. Аналогично давление в нижней жидкости:

$$P_2 = P - (g + g_1)\rho_2 y + \rho_2 \Phi_2.$$

На границе раздела выполняется условие: $P_1 = P_2$ или

$$-(g + g_1)(\rho_2 - \rho_1)y = (\rho_2 + \rho_1)nAe^{nt} \cos kx. \quad (4)$$

Отсюда с учетом выражения (3) получаем соотношение между постоянными n и k :

$$n^2 = -k(g + g_1) \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}. \quad (5)$$

Если $(g + g_1)$ отрицательно, то n^2 положительно. В этом случае потенциалы скоростей имеют вид:

$$\Phi_1 = (Ae^{nt-ky} + Be^{-nt-ky}) \cos kx, \quad (6)$$

$$\Phi_2 = (Ae^{nt+ky} + Be^{-nt+ky}) \cos kx. \quad (7)$$

Здесь B — произвольная постоянная. Из (5) следует, что

$$n = \sqrt{-k(g + g_1) \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}}.$$

Если первоначальное смещение поверхности раздела от плоскости $y=0$ есть $\eta_0 = C \cos kx$ и первоначальная скорость равна нулю, то уравнения (3), (6) и (7) принимают вид:

$$\eta = C \operatorname{ch} nt \cos kx, \quad (8)$$

$$\Phi_1 = \frac{nC}{k} e^{-ky} \operatorname{sh} nt \cos kx, \quad (9)$$

$$\Phi_2 = -\frac{nC}{k} e^{ky} \operatorname{sh} nt \cos kx. \quad (10)$$

Очевидно, что первоначальное возмущение поверхности раздела будет расти экспоненциально с nt до тех пор, пока не достигнет величины, которая уже не мала в сравнении с длиной волны. Далее линейная теория перестает быть справедливой. В этом случае скорость развития неустойчивости пропорциональна величине

$$n_0 = \sqrt{\frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}}. \quad (11)$$

Аналогично в работе [3] исследуется неустойчивость границы раздела, если возмущение задается на свободной поверхности, а затем после приложения давления распространяются до границы. Кроме того, в работе делается вывод о том, что при $g_1 \gg g$ усиление неустойчивого возмущения зависит только от соотношения плотностей двух жидкостей и числа длин волн, благодаря которым они возмущены.

Для различных жидкостей эти выводы были экспериментально подтверждены в работе [4].

Неустойчивость границы раздела между соударяющимися металлами. Выше было отмечено, что при высокоскоростных соударениях двух металлических пластин граница раздела некоторое время (порядка $5 \div 10 \mu\text{с}$) может находиться в состоянии, близком к жидкому. Очевидно, что в течение этого времени и может возникнуть неустойчивость границы раздела, если при этом действует ускорение, направленное от более легкой жидкости к более тяжелой.

При соударении свинцовой пластины с пластиной из металла, имеющей меньшую плотность, для появления неустойчивости границы раздела ускорение должно быть направлено от границы раздела в сторону свинца.

Рассмотрим случаи, когда после соударения может появиться ускорение в сторону свинца. В зависимости от соотношений динамических жесткостей соударяющихся металлов от границы соударения будут распространяться две ударные волны — отраженная и проходящая, если динамическая жесткость нижнего металла больше динамической жесткости верхнего металла. А в случае, когда динамическая жесткость верхнего металла больше нижнего, то в верхний металл будет распространяться отраженная волна разрежения, а в нижний — ударная волна. Ожидать появления ускорения нужного знака в проходящей ударной волне трудно из-за того, что ширина фронта ударной волны порядка расстояния свободного пробега, а для развития неустойчивости границы раздела, по-видимому, необходимо, чтобы ускорялся некоторый макрослой вещества.

Ускорение, вызывающее неустойчивость, может возникнуть при прохождении волны разгрузки. Поэтому ускорение границы раздела в сторону свинца может появиться сразу же после соударения, если динами-

ческая жесткость нижнего металла меньше динамической жесткости свинца. В противном случае ускорение начнет действовать после прихода волны разгрузки со стороны одной из свободных поверхностей.

Следовательно, в соответствии с выводами Тэйлора о неустойчивости границы раздела, могут развиваться как начальные возмущения на границе раздела, если таковые существуют, так и возмущения, пришедшие на границу раздела от свободной поверхности.

Роль свободных поверхностей в процессе потери устойчивости границы раздела. Эксперименты по плоскому соударению пластин проводились по схеме, изображенной на рис. 2, где 1 — неподвижная пластина, 2 — метаемая свинцовая пластина, 3 — заряд ВВ, 4 — детонатор. Пластины металлизировались скользящей детонационной волной, поэтому свинцовая пластина устанавливалась по отношению к неподвижной под отрицательным углом α , равным углу поворота пластины в точке фронта детонации.

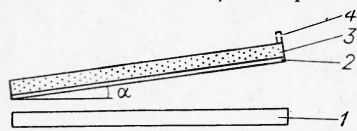


Рис. 2.

Таким образом, после прохождения детонации по всему заряду и поворота метаемой пластины на угол α , происходило соударение, близкое к плоскому.

В поставленных экспериментах исследовалось влияние свободных поверхностей нижней и верхней пластин. Была проведена серия экспериментов, в которых изменялось время прихода волны разгрузки со свободной поверхности нижней пластины. Это изменение времени прихода волны разгрузки со стороны свободной поверхности нижней пластины достигалось изменением толщины последней. В экспериментах, когда нижняя пластина была стальной, толщина ее менялась от 3 до 30 мм. При этом толщина верхней пластины оставалась неизменной и равной 2 мм. Исследования показали, что изменение времени прихода волны не приводит к изменению картины потери устойчивости границы раздела. Кроме этого, на свободной поверхности нижней пластины искусственно создавались начальные возмущения (луночки различных размеров). В этих случаях картина потери устойчивости в сравнении со случаями, когда нижняя свободная поверхность не возмущена, изменений не претерпевала.

Отсюда следует, что определяющими в этом процессе могут быть только возмущения, имеющиеся на свободной поверхности свинцовой пластины для случаев, когда в соответствии с соотношениями динамических жесткостей соударяющихся пластин в обе стороны от границы соударения уходят ударные волны. В работе [5] исследовано появление и развитие возмущений на свободных поверхностях метаемой взрывом оболочки. Автору этой работы удалось экспериментально зафиксировать эти возмущения только для оболочек из свинца и олова.

Была поставлена специальная серия экспериментов, в которых сохранялась неизменной скорость соударения и изменялась (в сторону увеличения) толщина метаемой свинцовой пластины. На полученных после соударения пластинах отмечено увеличение геометрических размеров следов потери устойчивости границы раздела. Это увеличение можно объяснить зависимостью ширины фронта волны разгрузки от толщины пластины свинца. Если учесть, что ускорение действует лишь во время разгрузки, то изменение толщины свинцовой пластины и должно привести к изменению характерных размеров следов потери устойчивости.

Экспериментальное исследование параметров неустойчивости границы раздела. Как отмечалось выше, потеря устойчивости границы раздела между соударяющимися поверхностями сопровождаются характерными выплесками металла из поверхности нижней пластины в сторону свинца (см. рис. 1). Эти выплески имеют вид, схематически изображен-

ный на рис. 3. На этом же рисунке показаны характерные размеры выплеска — это высота или амплитуда a и диаметр возмущенной зоны или длина волны λ . Образование и рост во времени похожего выплеска на границе раздела двух жидкостей описаны, по результатам машинного счета, в работе [6]. На рис. 4 для разных моментов времени показано изменение выплеска в соответствии с работой [6]. На рис. 5 представлена фотография микрошлифа сечения выплеска, образовавшегося при соударении свинцовой пластины со стальной. При исследовании микроструктуры выплеска можно заметить, что характер течения в нем соответствует деформированию стали в пластическом состоянии. Анализируя эти рисунки, можно прийти к выводу, что выплески, образовавшиеся в результате потери устойчивости границы раздела соударяющихся металлических пластин, имеют такую же форму и такой же характер течения при их образовании, как и выплески, образующиеся при потере устойчивости границы раздела двух жидкостей.

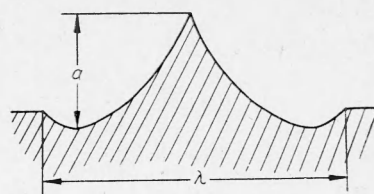


Рис. 3.

В соответствии с выводами, сделанными в работе [3], скорость развития неустойчивости пропорциональна величине n_0 , определяемой соотношением (11). Если этот закон возрастания возмущений справедлив для случая соударения двух металлических поверхностей, то при соударении свинцовой пластины с пластинами из разных металлов, должны быть разными амплитуда и длина волны, даже если время развития неустойчивости одинаково, что достигается в тех случаях, когда неизменной остается толщина метаемой свинцовой пластины. Ниже приведены результаты экспериментов для случая, когда на различные металлы металась свинцовая пластина толщиной 2 мм со скоростью 470 м/с и максимальные значения величин λ , определяемые с помощью измерений возмущений поверхности после соударения:

Металл	n_0	λ , мм
Титан	0,43	8
Сталь	0,17	6
Медь	0,11	5

Отметим, что частичный отрыв вершин выплесков при разлете пластин не позволяет достаточно точно измерить их амплитуду.

Увеличение в два раза толщины свинцовой пластины приводит к увеличению примерно в два раза длины волны выплеска. Как сказано выше, при разлете пластин после соударения, вершины выплесков обрываются, поэтому очень трудно определить степень увеличения амплитуды.

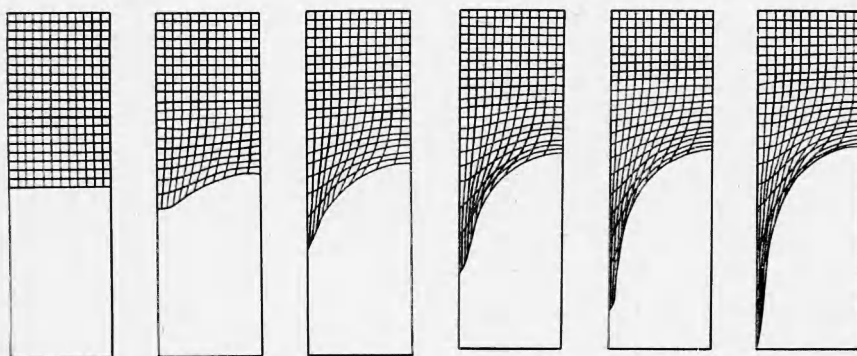


Рис. 4.

ды в этом случае, хотя само увеличение амплитуды в эксперименте очевидно.

Измеряя радиус возмущенной зоны вокруг выплеска, можно оценить снизу время, в течение которого происходит развитие неустойчивости. Если предположить, что металл втекает в образующийся выплеск со скоростью не большей, чем скорость звука, то для свинцовой пластины толщиной 2 мм время развития неустойчивости на стали соответствует примерно 0,5 мкс, а для свинцовой пластины толщиной 4 мм соответствующее время на стали составит величину порядка 1 мкс. В дей-



Рис. 5.

ствительности это время будет несколько большим, так как скорость втекания металла в выплеск, по-видимому, меньше скорости звука. Вместе с этим, оценка времени, в течение которого соударяющиеся металлы находятся в пластическом состоянии соответствует 5—10 мкс [2]. Таким образом, можно считать, что неустойчивость границы раздела успевает развиться до тех пор, пока сама граница не затвердевает. Подтверждением тому является отсутствие следов потери устойчивости при метании свинцовой пластины толщиной 9 мм. В этом случае волна разгрузки со свободной поверхности свинца приходит на границу раздела не раньше, чем через 13 мкс после соударения. А к этому времени соударяющиеся поверхности, по-видимому, перестают быть пластичными.

Автор выражает благодарность А. А. Дерибасу, А. Е. Войтенко и Г. Е. Кузьмину за ценные советы и указания при обсуждении результатов работы.

Поступила в редакцию
2/XII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1972, 8, 3.
3. G. Taylor. Proc. Roy. Soc. 1950, 201, 22.
4. D. J. Lewis. Proc. Roy. Soc. 1950, 202A.
5. L. A. Elliot. Fourth Symposium (Intern.) on Detonation. 1965.
6. C. W. Hirt, J. L. Cook, T. D. Butler. Тр. секции по численным методам в газовой динамике Второго международного коллоквиума по газодинамике взрыва и реагирующих систем (Новосибирск, 1969), т. II. М., 1971.