

УДК 534.222.2

## РАЗВИТИЕ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ ПРОДУКТЫ ВЗРЫВА — МЕТАЛЛ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

О. Б. Дреннов, А. И. Давыдов, А. Л. Михайлов, В. А. Раевский

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров

Представлены результаты экспериментов, в которых наблюдалось развитие периодических возмущений на контактной границе продукты взрыва — металл. Проведены эксперименты как со сферической, так и с плоской геометрией. Исследованы критические режимы волнообразования (скорость детонации заряда взрывчатого вещества  $D \geq 6,9$  мм/мкс). Дается объяснение этого эффекта. В эксперименте обнаружено, что под воздействием динамического импульса на границе продукты взрыва — металл реализуются интенсивные пластические деформации, приводящие к термическому разрушению приграничного слоя стали. В этом слое реализуется неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. Проведенная расчетно-аналитическая оценка критической граничной неустойчивой длины волны удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента.

Неустойчивость Кельвина — Гельмгольца (сдвиговая неустойчивость) является гидродинамической неустойчивостью поверхности раздела веществ при течении двух контактирующих потоков с различными тангенциальными скоростями [1]. Математическое описание неустойчивости поверхностей раздела является приближенным. Обычно не учитываются такие явления, как молекулярная диффузия (для газов или способных перемешиваться жидкостей), испарение или конденсация, вязкость. Для простоты сначала неустойчивость Кельвина — Гельмгольца была определена для идеализированной жидкости (невязкой несжимаемой). В простейшей форме неустойчивость описывается граничными условиями [2]

$$U(y) = \begin{cases} U, & y < 0, \\ U', & y > 0, \end{cases} \quad \rho(y) = \begin{cases} \rho, & y < 0, \\ \rho', & y > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho, \rho'$  — плотности слоев жидкости;  $U, U'$  — скорости их движения.

Неустойчивость Кельвина — Гельмгольца является динамической неустойчивостью поверхности раздела  $y = 0$  течения при граничных условиях (1), в том числе в случае  $\rho = \rho'$  (однородная жидкость),  $g = 0$  ( $g$  — ускорение свободного падения). Поверхностное натяжение на границе  $y = 0$  ослабляет неустойчивость, но не устраняет ее.

С математической точки зрения задача о неустойчивости Кельвина — Гельмгольца в невязкой жидкости — это задача с начальными данными для автономной консервативной лагранжевой динамической системы с бесконечно большим числом степеней свободы. Равновесное течение (с условиями (1)) представляет собой состояние равновесия такой системы, устойчивость которой может быть исследована с использованием теории малых колебаний. Согласно этой теории произвольное малое колебание можно представить в виде линейной суперпозиции элементарных волновых решений. Амплитуда  $a(t)$  любой  $k$ -й

элементарной волны удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению вида

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = S(k)a. \quad (2)$$

Условие устойчивости имеет вид  $S(k) < 0$  для всех  $k$ . Здесь  $S(k)$  — так называемый фактор роста возмущений, являющийся функцией волнового числа.

В частном случае плоской поверхности раздела, описываемой соотношениями (1), элементарное волновое решение дифференциального уравнения (2) соответствует синусоидальным возмущениям поверхности раздела с произвольной длиной волны  $\lambda = 2\pi/k$ . В случае горизонтальной границы в вертикальном поле силы тяжести (две жидкости разной плотности движутся с различными скоростями) синусоидальное возмущение граничной поверхности с длиной волны  $\lambda = 2\pi/k$  должно возрастать по экспоненциальному закону  $\exp(S(k)t)$  [2], где

$$S(k) = \frac{\rho\rho'k^2}{(\rho + \rho')^2} (U - U')^2 - \frac{\rho - \rho'}{\rho + \rho'} (g - \ddot{y})k - \frac{\sigma k^3}{\rho + \rho'}, \quad (3)$$

$\ddot{y}$  — ускорение легкого слоя;  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе раздела;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число (вводится для симметризации уравнения плоской волны относительно  $x$  и  $t$ ).

Условие устойчивости для соотношения (3) запишется в следующем виде [2]:

$$4g(\rho - \rho')\sigma > \rho^2\rho'^2(U - U')^4/(\rho + \rho')^2.$$

Явление неустойчивости Кельвина — Гельмгольца изучено достаточно полно для жидкостей и газов (рассматривались контактные границы газ — газ, газ — жидкость, жидкость — жидкость) [1–5].

В последние десятилетия появились работы, содержащие результаты экспериментов, в которых наблюдалось развитие сдвиговой неустойчивости на контактной границе двух металлов [6–9]. Однако до сих пор отсутствуют публикации, в которых исследуется состояние контактной границы между прочной средой (металл) и средой без прочности (газ, жидкость) в условиях высокоскоростного относительного течения. Хотя процесс метания пластин продуктами взрыва (ПВ) при скользящей детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) известен и используется достаточно давно (сварка взрывом, плакирование и т. п.), ни в одной из работ не отмечались особенности состояния контактной границы ПВ — металл после динамического нагружения. В [10] отмечено, что на контактной границе ПВ — металл (при скользящей детонации заряда ВВ) образуется аналог кумулятивной струи, о чем свидетельствуют следы воздействия струи (раковины, каверны) на поверхности металлической преграды, перпендикулярной направлению движения фронта детонационной волны.

Ниже приводятся результаты экспериментов, в которых наблюдается развитие возмущений на контактной границе ПВ — металл при скользящей детонации заряда ВВ. Схема нагружения представлена на рис. 1. Использовалось нагружающее устройство сферической геометрии. Сферическая капсула из стали марки ст.10 (внешний радиус  $R = 87$  мм, толщина  $\Delta = 4$  мм) заполнялась пористым веществом (стеклопорошком насыпной плотности  $\rho \approx 1,4$  г/см<sup>3</sup>) и помещалась внутрь сферического слоя ВВ из тротила ( $\rho_0 = 1,6$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 6,9$  мм/мкс, внешний радиус  $r = 127$  мм, толщина  $\delta = 40$  мм). В экспериментах слой ВВ контактировал с металлом. После подрыва на контактной поверхности (границе раздела ВВ — металл) стальной капсулы зафиксированы крупные периодические волнообразные возмущения. На рис. 2 приведена макрофотография фрагмента поверхности, на рис. 3 — фотография микрошлифа контактной границы ПВ — металл. Возмущения характеризуются следующими параметрами: длина волны  $\lambda \approx 2,5$  мм, амплитуда  $a \approx 0,22$  мм.

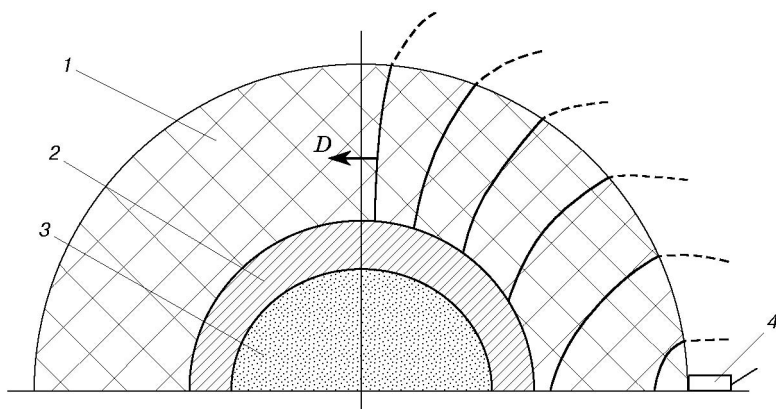


Рис. 1. Схема нагружения в эксперименте со сферической геометрией:  
1 — сферический слой ВВ; 2 — капсула из стали; 3 — стеклопорошок; 4 — инициирующий элемент

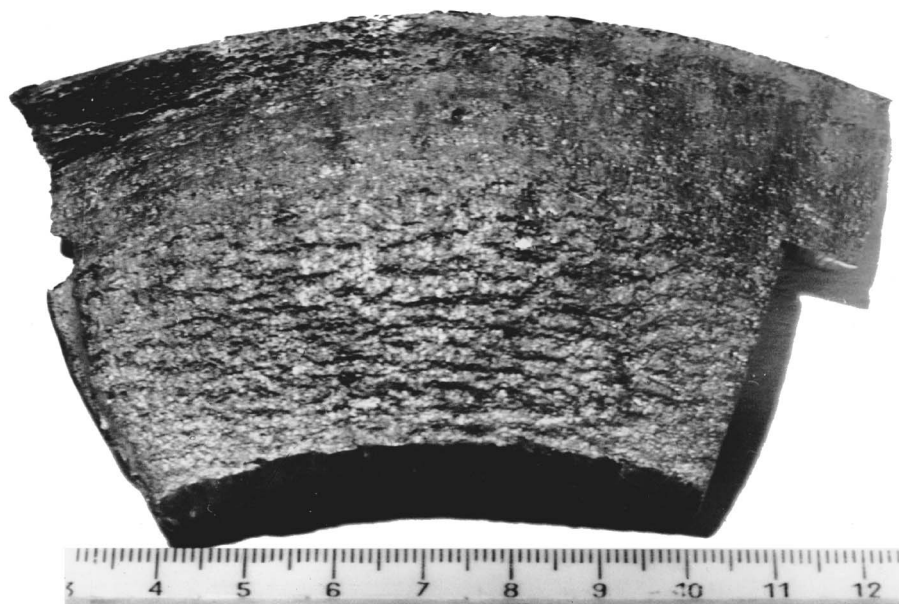


Рис. 2. Макрофотография фрагмента внешней поверхности стальной капсулы

Вероятно, вдоль границы раздела горячие ПВ — металл развивалась неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. Данные о реализации сдвиговой неустойчивости при высокоскоростном скольжении газа вдоль поверхности твердого тела получены впервые.

Следует отметить, что устойчивое развитие возмущений наблюдается в слое, выше которого угол между фронтом скользящей детонационной волны и контактной поверхностью оболочки достигает  $90^\circ$ .

Аналогичные результаты получены при проведении экспериментов с плоской геометрией. Схема нагружения приведена на рис. 4. Плоский заряд бризантного ВВ (пластифицированный состав на основе октогена с плотностью  $\rho = 1,86 \text{ г/см}^3$  и скоростью детонационной волны  $D = 8,75 \text{ мм/мкс}$ ) располагался на поверхности стальной пластины (сталь марки ст.3). В заряде ВВ по линии контакта инициировалась скользящая детонационная волна. На расстоянии от точки инициирования  $L \geq 200 \text{ мм}$ , когда фронт детонационной волны становится практически перпендикулярным плоскости пластины, на

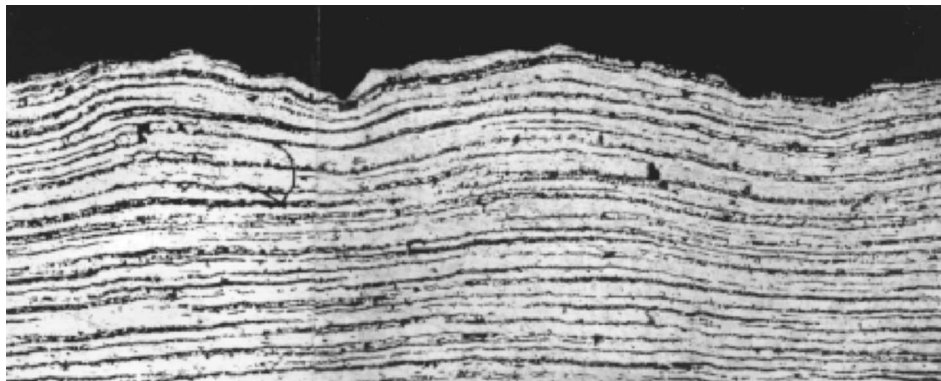


Рис. 3. Фотография микрошлифа контактной границы стали (ст.10) ( $a \approx 0,22$  мм;  $\lambda \approx 2,5$  мм).  $\times 25$

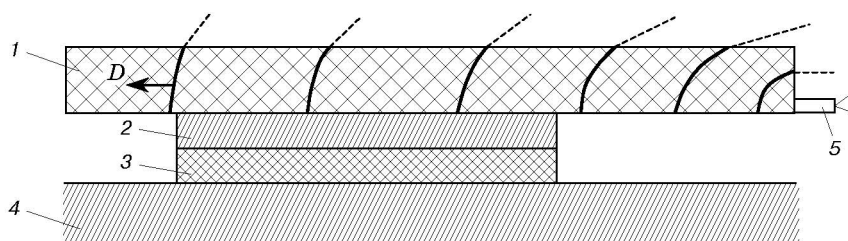


Рис. 4. Схема нагружения в эксперименте с плоской геометрией:

1 — плоский заряд ВВ; 2 — пластина из стали; 3 — пластина из пенопласта; 4 — подставка; 5 — инициирующий элемент

контактной границе ПВ — металл возникали периодические волнообразные возмущения ( $0,08 \text{ мм} \leq a \leq 0,1 \text{ мм}$ ;  $1,8 \text{ мм} \leq \lambda \leq 2,0 \text{ мм}$ ), фиксируемые на поверхности сохраняемой после взрыва пластины (рис. 5).

По-видимому, возмущения образуются вследствие развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца на контактной границе ПВ — металл. Разогретые ПВ (до температуры около  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с большой скоростью ( $U = D/4 \leq 2,2 \text{ мм/мкс}$ ) скользят вдоль поверхности стальной пластины. В этих условиях как тангенциальной, так и нормальной скоростью материала металлического слоя можно пренебречь. В результате кратковременного динамического воздействия на контактной границе ПВ — металл развиваются интенсивные пластические деформации, приводящие к разогреву и термическому разупрочнению небольшого по толщине приграничного слоя металла. Динамическое воздействие на металл происходит в течение времени  $t_1 \approx 8 \text{ мкс}$  (до прихода волны разрежения с внешней границы слоя ВВ на контактную границу).

Толщину разогретого разупрочненного слоя стали для эксперимента со сферической геометрией можно оценить из соотношения

$$l \approx (\tau \alpha)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $l$  — толщина разогретого слоя;  $\tau$  — время температурного воздействия;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности.

Из (4) следует, что  $l \approx 130 \text{ мкм}$ . В этом слое под действием большой вращательной составляющей тангенциальной скорости развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. При этом данный слой вовлекает в формирование возмущений граничащие с ним слои металла, поэтому реализуются возмущения с амплитудой ( $a \approx 220 \text{ мкм}$ ), большей толщины разогретого разупрочненного слоя. Вообще говоря, тол-

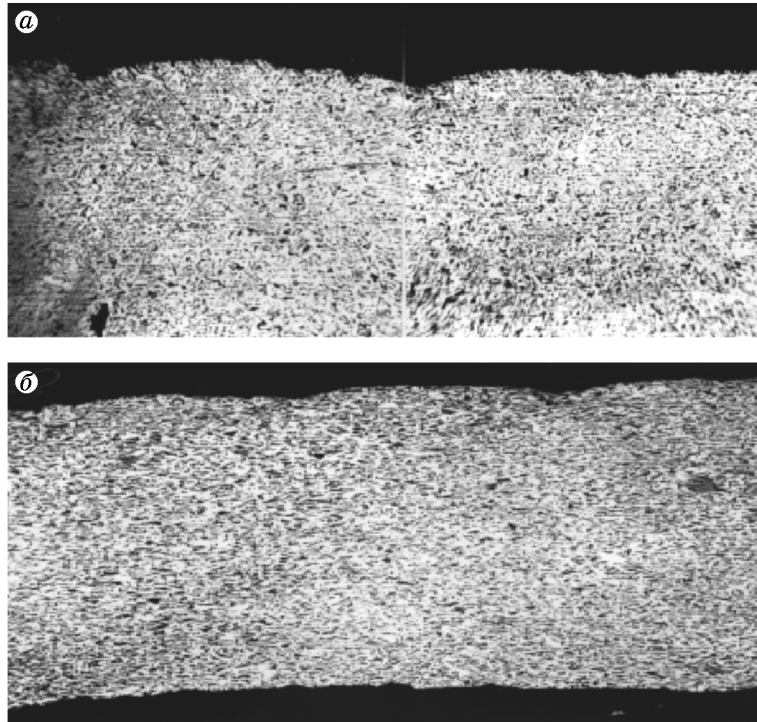


Рис. 5. Фотографии микрошлифов контактных границ стали (ст.3).  $\times 25$ :  
 а —  $a \approx 0,1$  мм,  $\lambda \approx 2$  мм; б —  $a \approx 0,08$  мм,  $\lambda \approx 1,8$  мм

щина неустойчивого слоя  $x$  определяется длиной волны возмущения  $\lambda$  по соотношению  $a \approx \cos(kx) \exp(-2\pi x/\lambda)$ . Максимальная толщина этого слоя составляет  $x \approx \lambda/(2\pi)$ . В рассмотренном выше случае  $x \approx 400$  мкм, что по порядку величины совпадает с зарегистрированной в опытах амплитудой возмущений  $a$ .

Начальное возмущение ( $a_0 \approx 10$  мкм), определяемое исходной чистотой обработки поверхности, возрастает по экспоненциальному закону до тех пор, пока амплитуда возмущений не станет равной толщине разупрочненного слоя. Дальнейший рост возмущений сдерживается прочностными свойствами металла.

В работе [11] рассмотрена задача о развитии малых возмущений, когда идеальная жидкость скользит по поверхности прочного вещества. Такая постановка задачи соответствует случаю, когда одно вещество скользит по другому, утратившему в результате термического разупрочнения прочность в слое, прилегающем к поверхности контакта.

В приближении упругопластической среды получено критическое условие устойчивости слоя

$$a_0/\lambda \leq (a_0/\lambda)_{\text{кр}} \approx (\sigma_T/G)[(M_{\text{кр}}/M)^2 - 1]/(4\pi\sqrt{3}), \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести слоя;  $M = U/c$  — число Маха;  $c$  — скорость сдвиговой волны в упругом слое;  $U$  — скорость перемещения слоя идеальной жидкости;  $M_{\text{кр}}$  — критическое число Маха, зависящее от длины волны;  $G$  — модуль сдвига материала слоя.

Для длин волн, много меньших толщины слоя,  $M_{\text{кр}} \approx 1,8$ . В этом случае соотношение (5) принимает вид

$$(a_0/\lambda)_{\text{кр}} \approx (\sigma_T/G)[(1,8/M)^2 - 1]/(4\pi\sqrt{3}) \approx (\sigma_T/\rho)[(1,8/U)^2 - (1/c)^2]/(4\pi\sqrt{3}).$$

Для многих металлов при воздействии на них не очень сильных ударных волн ( $\rho/\rho_0 < 0,05$ )  $(\sigma_T/G)/(4\pi\sqrt{3}) \approx 10^{-3}$ . При скорости продуктов взрыва  $U \approx 2,2$  мм/мкс и скорости

сдвиговых волн в стали  $c = 2,8$  мм/мкс имеем

$$(a_0/\lambda)_{\text{кр}} \approx 10^{-3}[(1,8 \cdot 2,8/2,2)^2 - 1] \approx 4,25 \cdot 10^3.$$

При стандартной шероховатости  $a_0 \approx 10^{-2}$  мм граничная длина волны  $\lambda_{\text{кр}} \approx 2,4$  мм. Возмущения с большей длиной волны не растут. В экспериментах со сферической геометрией (наиболее интенсивное воздействие на материал) наблюдается рост возмущений с длиной волны  $\lambda \approx 2,5$  мм, что близко к приведенной выше оценке. В экспериментах с плоской геометрией растут возмущения с меньшей длиной волны.

Таким образом, зарегистрированный экспериментально рост возмущений на контактной границе ПВ — металл может быть объяснен развитием неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, в результате чего приграничный слой металла испытывает кратковременное термическое разупрочнение. Проведена оценка предельной величины длины волны возмущений  $\lambda_{\text{кр}}$ . Возмущения с большей длиной волны не растут.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Биркгоф Г.** Гидродинамика: Методы, факты, подобие. М.: Изд-во иностр. лит., 1969.
2. **Гидродинамическая неустойчивость** / Под ред. Г. Биркгофа. М.: Мир, 1964.
3. **Amsden A., Harlow F.** Slip instability // Phys. Fluids. 1964. V. 7, N 3. P. 327–334.
4. **Gerwin R.** Stability of the interface between two fluids in relative motion // Rev. Modern Phys. 1968. V. 40, N 3. P. 652–658.
5. **Esch R.** The instability of a shear layer between two parallel streams // J. Fluid Mech. 1957. V. 3, pt 3. P. 289–303.
6. **Михайлов А. Л.** Сдвиговая неустойчивость границы раздела в металлах // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 2. С. 158–161.
7. **Дреннов О. Б.** О развитии возмущений на контактной границе алюминий — медь в нестационарном режиме косоугольного соударения // ПМТФ. 1989. № 3. С. 41–44.
8. **Дреннов О. Б.** О развитии сдвиговой неустойчивости в металлах // Журн. техн. физики. 1999. Т. 69, вып. 2. С. 38–43.
9. **Дреннов О. Б.** О развитии сдвиговой неустойчивости в средах, обладающих прочностью // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 8. С. 86–89.
10. **Миндели Э. О., Кабулашвили В. Г., Мардалешвили Т. Г., Чагелишвили Э. Ш.** Влияние начальной температуры на процесс струе- и волнообразования при сварке взрывом // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 1. С. 150–155.
11. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Низовцев П. Н., Раевский В. А.** Развитие возмущений на границе раздела металлов при косом соударении со сверхзвуковой скоростью перемещения точки контакта // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 2001. Вып. 1. С. 34–42.

*Поступила в редакцию 2/IV 2002 г.,  
в окончательном варианте — 16/V 2002 г.*