

УДК 534.222.2

## О ЗАДАНИИ И ЭВОЛЮЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ (ПЕРИОДИЧЕСКИХ) ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ — ТЕЙЛОРА В СРЕДАХ С ПРОЧНОСТЬЮ

О. Б. Дреннов, А. Л. Михайлов, В. А. Огородников

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Обсуждены различные способы задания начальных локальных или периодических возмущений на границах твердых тел с прочностью. Экспериментально исследована эволюция локального возмущения. Показано, что определяющую роль в трансформации возмущения играют «разномасшность» зоны возмущения и геометрические размеры вставки.

Явление неустойчивости возмущенных границ раздела и свободной поверхности вещества, движущихся с переменным ускорением, представляет большой интерес для специалистов в различных областях физики высоких плотностей энергии. Обычно исследуются неустойчивость Рэля — Тейлора, возникающая при действии на границу раздела сред разной плотности ускорения, вектор которого перпендикулярен поверхности раздела и направлен от вещества с меньшей плотностью [1]; неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, возникающая, когда стационарная ударная волна (УВ), направление распространения которой перпендикулярно границе раздела веществ разной плотности, проходит через эту границу [2]; неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, возникающая, когда имеется разрыв тангенциальной составляющей поля скоростей [3]. Следует отметить, что эти явления наиболее подробно исследованы для веществ в жидком и газообразном состояниях. Менее изучена неустойчивость в твердых средах с прочностью, а имеющиеся публикации носят отрывочный и противоречивый характер. Тем не менее в результате экспериментальных [4–8] и расчетно-теоретических исследований в рамках идеально упругой [9], идеально пластической [10–12] моделей среды установлено, что реологические характеристики среды (прочность, вязкость) оказывают стабилизирующее действие на развитие возмущений границ или поверхностей. В зависимости от используемой модели среды в качестве критериев, определяющих переход возмущенной поверхности из устойчивой в неустойчивую область, приняты следующие параметры возмущений: критическая длина волны [9, 10], критическая начальная амплитуда [13] или их комбинация [11].

Существуют различные способы задания начальных локальных (периодических) возмущений. Часто их выбор обусловлен соображениями удобства при дальнейшем использовании в численных расчетах. В связи с этим имеет смысл остановиться на вопросе о способах задания начальных локальных и периодических возмущений на границах (поверхностях) твердых сред с прочностью, неустойчивость которых исследуется в экспериментах.

Первые экспериментальные результаты по исследованию неустойчивости границ в средах с прочностью опубликованы, по-видимому, в работах [4, 5]. В этих экспериментах возмущения синусоидальной формы задавались в виде выточек на поверхности пластин из алюминия и стали, которые разгонялись с помощью заряда взрывчатого вещества (ВВ). Следует отметить, что за счет «разномасшности» более тонкие участки пластины долж-

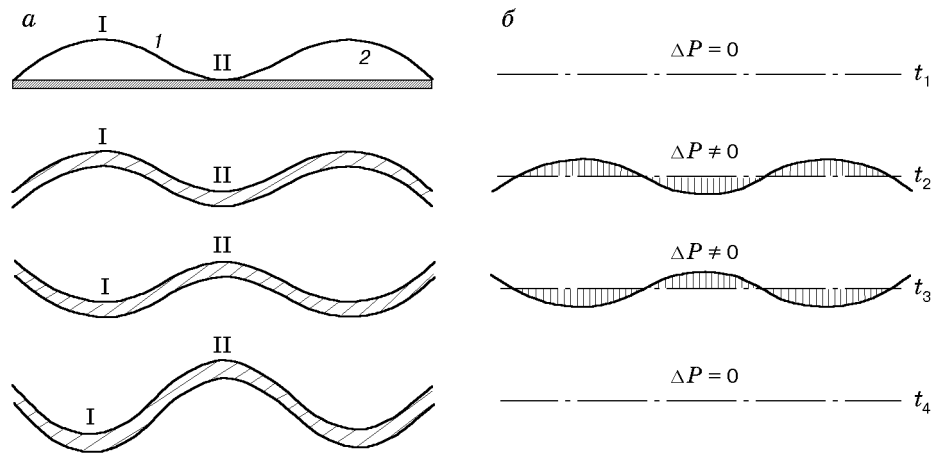


Рис. 1

ны приобретать бóльшие скорости. Под разномасностью понимается разность удельных масс в возмущенной и невозмущенной областях, отнесенная к удельной массе в невозмущенной области. Поэтому на исследуемый процесс может влиять увеличение амплитуды возмущений, связанное с разномасностью:  $\Delta t/t \simeq \Delta m/m$ . Кроме того, в более поздних исследованиях [8] при том же способе задания возмущений на пластинах из алюминия показано, что со временем происходит разрыв материала пластины по месту выполнения выточек.

В [6] локальное возмущение, имеющее форму, близкую к синусоидальной, задавалось у разгоняемых тонких пластин за счет выхода на них искривленного фронта ударной или детонационной волны (ДВ), генерируемой в экране или слое ВВ, к которому она примыкала, при нагружении ударником с искривленной поверхностью. В [7] начальные периодические возмущения синусоидальной формы у цилиндрических оболочек также задавались искривленным фронтом ДВ, которая создавалась за счет многоточечного инициирования заряда ВВ по его наружной поверхности. Эти способы задания начальных возмущений более соответствуют практическим целям, например при высокоскоростном метании и торможении металлических лайнеров, в задачах инерциального термоядерного синтеза и т. п. Однако здесь также имеются некоторые особенности эволюции начальных возмущений, связанные с неоднородностью давления («разнодинамичностью») за искривленным фронтом ДВ или УВ при выходе их на исследуемую пластину (оболочку). Под разнодинамичностью понимается разность распределения импульсов давления в профиле  $P(t)$  в возмущенной и невозмущенной областях. На рис. 1, а, б приведены эволюция формы пластины и эпюры избыточных давлений соответственно при выходе на нее искривленного фронта ДВ (1 — фронт ДВ, 2 — пластина). В этом случае за счет эффекта схождения за отстающими участками фронта (область I) появляются зоны повышенного давления ( $\Delta P_+ > 0$ ), за опережающими (область II) — зоны пониженного давления ( $\Delta P_- < 0$ ). Абсолютные значения  $\Delta P_+$ ,  $\Delta P_-$  зависят от кривизны соответствующих участков фронта. Из-за различия знаков  $\Delta P$  за отстающими и опережающими участками фронта отстающие участки пластин приобретают бóльшие скорости и опережают соседние участки. На первый взгляд вследствие возникшей разности скоростей между областями I и II пластины возмущения должны неограниченно возрастать. Однако этого не происходит, так как соотношение между  $\Delta P_+$  и  $\Delta P_-$ , а также разность скоростей не остаются постоянными. От возникших в начальный момент локальных зон повышенного (пониженного) давления распространяются сферические волны сжатия (растяжения), и области сжатия сменяются областями растяжения при монотонном уменьшении амплитуды колебания  $\Delta P$ . Действительно,

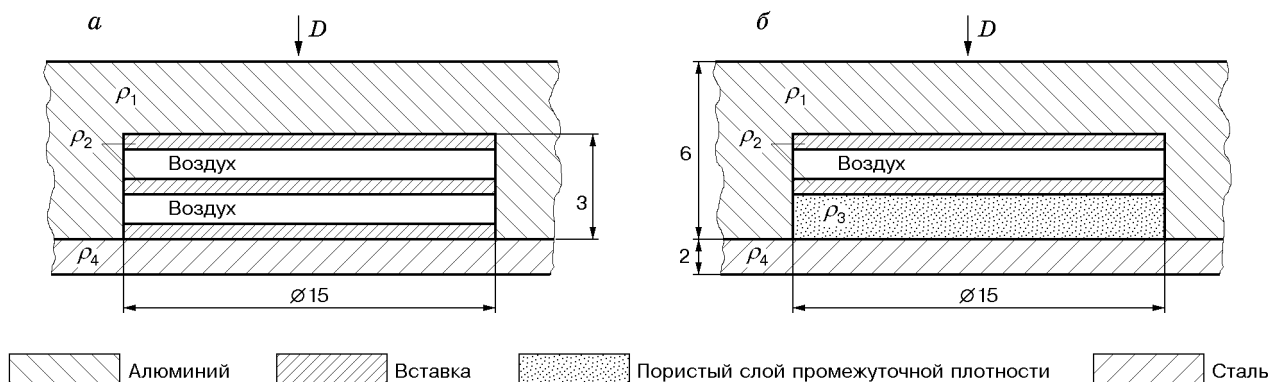


Рис. 2

опыты по разгону тонких пластин в воздухе и вакууме [6] показывают, что рассмотренная особенность, связанная с разнородностью искривленного фронта УВ, приводит к изменению фазы начального возмущения и не влияет на его амплитуду в дальнейшем. Об этом свидетельствуют и результаты опытов по разгону пластин при многоточечном инициировании заряда ВВ [14]. В то же время в [14] отмечено, что если значение  $\Delta P$  соизмеримо с прочностью материала пластины, то за счет разнородности может наблюдаться трансформация возмущения, например удвоение его частоты.

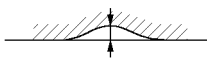
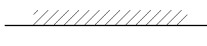
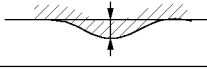

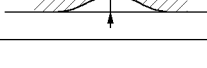
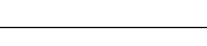
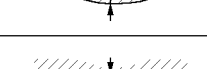

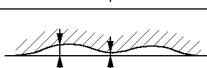
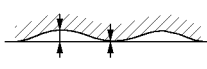
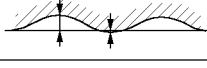

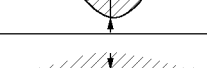
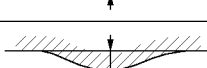
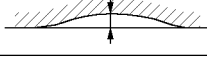



Ниже приведены результаты экспериментальных исследований другого способа задания начальных локальных возмущений для исследования неустойчивости Рэлея — Тейлора в средах с прочностью. Используется слойка из двух пластин разной плотности, например из алюминия и стали, в одной из которых имеется вставка для задания возмущения (рис. 2;  $a - \rho_4 > \rho_2 > \rho_1$ ,  $b - \rho_4 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_1$ ). Такая геометрия сборки позволяет варьировать и контролировать характерные исходные и текущие параметры развивающейся неустойчивости:

- соответствующим подбором соотношения плотностей и геометрических размеров вставки (рис. 2) можно деформировать фронт ударной волны с целью получения требуемой формы и необходимой амплитуды. Исходя из условий задания локального возмущения параметры УВ легко рассчитываются для одномерной и двумерной геометрии;

- можно создавать локальное возмущение удельной массы, т. е. зафиксировав, например, искривление УВ, варьировать массу в зоне возмущения. Таким образом можно определить влияние некоторой физической величины на развитие неустойчивости (при заданном локальном возмущении);

- можно задавать возмущения в амплитуде давления УВ и распределении давления за фронтом УВ, т. е. создавать профиль давления УВ заданной формы и соответствующей длительности. Этот эффект также достигается подбором плотностей и геометрических размеров вставки.

Слойка разгоняется продуктами взрыва при детонации заряда ВВ. При этом реализуется система, в которой ускорение направлено от легкого слоя (алюминий) к тяжелому (сталь), и создаются условия для развития неустойчивости Рэлея — Тейлора. В экспериментах, так же как в [6, 15], фотохронографическим методом с помощью оптического приемника с отсечкой, располагаемого на различных расстояниях  $l$  от свободной поверхности стальной пластины, исследовалось поведение ее участка в области вставки. Результаты экспериментов представлены в таблице, где  $\Delta t$  — «разновременность» участка стальной пластины в области со вставкой (под разновременностью понимается асинхронность пересечения различными участками пластины плоскости оптического приемника);  $\Delta m = (m_{\text{в}} - m)/m$  — дефект массы, вносимый материалом вставки; знак «-» или «+»

Схема локального возмущения	Профиль свободной границы стальной пластины	$l$ , мм	$\Delta m$ , %	$\Delta t$ , мкс
$\rho_4 > \rho_2 > \rho_1$		0	-7,4	0,31
		2	-7,1	~ 0
		5	-7,0	+0,32
		10	-7,1	+0,69
		0	~ 0	-0,29
		2	~ 0	~ 0
		5	~ 0	+0,14
		10	~ 0	+0,20
		20	~ 0	+0,47
		2	+7,9	-0,19
		5	+8,1	-0,22
		10	+7,9	-0,28
		20	+7,9	+0,39
		30	+7,9	+0,62
$\rho_4 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_1$		0	~ 0	-0,15
		20	~ 0	+0,28
		20	+8,5	+0,26
		20	+10,7	+0,22

у символа  $\Delta m$  обозначает, что область со вставкой легче или тяжелее невозмущенной области;  $m_b$  и  $m$  — массы возмущенной и невозмущенной областей.

Из таблицы следуют те же закономерности, связанные с эволюцией возмущения, что и в описанных выше случаях с искривленным фронтом УВ или ДВ. Непосредственно под вставкой УВ выходит с некоторым отставанием  $\Delta t$ , которое определяется различием скоростей УВ.

За время полета пластины происходит смена знака возмущения на свободной поверхности пластины в области под вставкой: отставание переходит в опережение независимо от разномасности, значение которой менялось в пределах  $-8\% < \Delta m < 8\%$ . При  $\Delta m = -8\%$  и  $\Delta m = 0$  смена знака возмущения происходит в начале движения пластины ( $l \leq 5$  мм), при  $\Delta m = 8\%$  — на более поздних стадиях движения пластины.

На одной и той же базе измерения изменение массы локального возмущения в сторону положительных значений  $\Delta m$  приводит к уменьшению величины опережающего возмущения. Под краями локального возмущения возникает отставание, хотя участок, соответствующий центру возмущения, по-прежнему находится в опережении. Как уже отмечалось, отставание под локальным возмущением определяется разностью скоростей ударной волны в пластине и зоне возмущения.

Волны разгрузки, формирующиеся на границе зон, движущихся с разными скоростями, тормозят полет невозмущенной области в пластине. В результате зона отставания (впадина) движется с большей скоростью, формируется опережающее возмущение (выпуклость). Утяжеление зоны возмущения ( $\Delta m > 0$ ) сглаживает влияние волны разрежения.

В заключение следует отметить, что в опытах, проведенных с большим диаметром возмущения (диаметр вставки 30 мм) при прочих равных условиях, общий характер эволюции локального возмущения не меняется, а при замене слоя из стали слоем из свинца происходит увеличение амплитуды возмущения. Таким образом, рассмотренный способ задания локальных возмущений позволяет варьировать и контролировать исходные и текущие параметры возмущений при исследовании процесса неустойчивости в средах с прочностью.

Авторы выражают благодарность Р. С. Осипову и А. И. Паленову за помощь в проведении экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гидродинамическая неустойчивость.** М.: Мир, 1964.
2. **Мешков Е. Е.** Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // *Механика жидкости и газа.* 1969. № 5. С. 151–158.
3. **Биркгоф Г.** *Гидродинамика.* М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
4. **Barnes J. F., Blewitt P. J., McQueen R. G., et al.** Taylor instability in solids // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45, N 2. P. 727–732.
5. **Barnes J. F., Janney D. R., London R. R., et al.** Further experimentation on Taylor instability in solids // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51, N 9. P. 78, 79.
6. **Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Огородников В. А. и др.** Разгон пластин до гиперзвуковых скоростей. Неустойчивость при торможении о воздух // *ПМТФ.* 1982. № 2. С. 90–94.
7. **Иванов А. Г., Огородников В. А., Карпенко Г. Я. и др.** О влиянии сдвиговой прочности на развитие неустойчивости при торможении сходящихся оболочек // *ПМТФ.* 1994. Т. 35, № 4. С. 163–167.

8. **Lebedev A. I., Nizovtsev P. N., Rayevsky V. A., Soloviov V. P.** Rayleigh — Taylor instability in strong substances: calculated experimental studies of instability in titanium // Proc. of the 6th Intern. workshop on the physics of compressible turbulent mixing, Marseille (France), 18–21 June, 1997. Marseille: Inst. Univ. des Syst. Thermiques Industr., 1997. P. 307–311.
9. **Miles J. W.** Taylor instability of a flat plate // General Atom. Rep. CAMD-7335. 1960. P. 1–20.
10. **Бахрах С. М., Ковалев Н. П.** Неустойчивость Тейлора в упругопластических средах // Числ. методы механики сплош. сред. 1980. Т. 11, № 2. С. 5–21.
11. **Низовцев П. Н., Раевский В. А.** Приближенное аналитическое решение задачи о рэлей-тейлоровской неустойчивости в прочных средах // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1991. Вып. 3. С. 11–17.
12. **Абакумов А. И., Лебедев А. Н., Низовцев П. Н. и др.** Рэлей-тейлоровская неустойчивость в упругопластической среде. Численное исследование // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1990. Вып. 3. С. 14–19.
13. **Друккер В.** Тейлоровская неустойчивость поверхности упругопластической пластины // Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. М.: Мир, 1983.
14. **Огородников В. А., Иванов А. Г.** Особенности откольного разрушения пластин при синхронном инициировании заряда ВВ в нескольких точках // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 67–71.
15. **Дубовик А. С.** Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1984.

*Поступила в редакцию 5/І 1998 г.,  
в окончательном варианте — 25/ІІ 1999 г.*

---