

В качестве критического принимается время, когда при постоянном прогибе ν момент m , удерживающий это состояние, уменьшится до нуля. Учитывая, что $\nu = \text{const}$, из (2), (3), (19) при $\dot{p} = k$ получим уравнение для амплитуды M возмущающего момента ($m = M \sin \mu y$):

$$M = U_0 T (D\alpha / (tnk) - 1).$$

Момент уменьшается от бесконечно большого значения при $t = 0$ до нуля за время

$$t_{\text{ив}} = \frac{\alpha}{nk} D,$$

совпадающее по величине с $t_{\text{шнл}}$ и с особой точкой первого порядка t_1 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Н.Х., Дроздов А.Д., Колмановский В.Б. Устойчивость вязкоупругих тел и конструкций // Итоги науки и техники. Мех. деф. твердого тела. — М.: ВИНТИ, 1987. — Т. 19.
2. Куршин Л.М. Устойчивость при ползучести // Изв. АН СССР. МТТ. — 1978. — № 3.
3. Кирсанов М.Н., Ключников В.Д. Определение особых точек процесса деформирования сжатого стержня в условиях ползучести // Изв. РАН. МТТ. — 1993. — № 3.
4. Ключников В.Д. Лекции по устойчивости деформируемых систем. — М.: Изд-во МГУ, 1986.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.
6. Работнов Ю.Н., Шестериков С.А. Устойчивость стержней и пластинок в условиях ползучести // ПММ. — 1957. — Т. 21, № 3.
7. Shanley F.R. Weight-strength analysis of aircraft structures. — N.Y.: McGraw-Hill Book Co, 1952.
8. Gerard G. A creep buckling hypothesis // J. Aeron. Sci. — 1956. — V. 23, N 9.
9. Иванов Г.В. Об устойчивости равновесия сжато-изогнутых тонких стержней при неупругих деформациях // ПМТФ. — 1961. — № 3.

г. Воронеж

Поступила 26/VII 1993 г.

УДК 539.374; 534.1

А.Г. Иванов, В.А. Огородников, Г.Я. Карпенко,
А.Д. Ковтун, А.А. Демидов, Л.А. Толстикова

О ВЛИЯНИИ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ СХОДЯЩИХСЯ ОБОЛОЧЕК

В [1] рассмотрены вопросы развития детерминированных возмущений у цилиндрических оболочек, заполненных воздухом и разгоняемых продуктами взрыва. Было установлено, что сдвиговая прочность материала оболочки заметным образом влияет на форму и амплитуду возмущений на стадии разгона оболочки к оси симметрии. Представляет интерес случай, когда сжимаемая оболочкой полость заполнена частично или, как, например, в [2], полностью более плотной, чем воздух, средой. При этом появляется возможность для изучения процессов торможения и последую-

© А.Г. Иванов, В.А. Огородников, Г.Я. Карпенко, А.Д. Ковтун, А.А. Демидов, Л.А. Толстикова, 1994

щего разлета оболочек, когда могут возникнуть условия для гравитационной неустойчивости Рэлея — Тейлора (РТ) границы раздела оболочка — сжимаемая среда [3].

1. При ускоренном движении границы раздела двух сред с различными плотностями (при наличии начальных возмущений) они могут быть неустойчивы, если ускорение направлено от легкой среды к тяжелой, и устойчивы, если ускорение имеет другое направление. На подлетной стадии движения оболочки к оси симметрии ускорение направлено к оси, при этом могут реализоваться условия для РТ-неустойчивости только на наружной границе оболочки, разгоняемой продуктами взрыва. Внутренняя граница оболочки (ВГО) будет устойчивой. При торможении оболочки и на разлетной стадии ее движения с изменением направления ускорения могут реализоваться условия для РТ-неустойчивости ВГО.

Если исследованию РТ-неустойчивости в жидкости и газах посвящено достаточно большое количество работ, то число публикаций по неустойчивости в твердых средах ограничено. В результате экспериментальных [4—6] и расчетно-теоретических исследований в рамках идеально упругой [7], идеально пластической [8] и упругопластической [9, 10] моделей среды удалось установить, что реологические характеристики среды (прочность, вязкость) оказывают существенное стабилизирующее влияние на РТ-неустойчивость. В зависимости от используемой модели среды в качестве критериев, определяющих переход поверхности из области устойчивости в неустойчивую область, приняты: критическая длина волны λ_* [7, 9], критическая начальная амплитуда возмущений a_* [8] или их комбинация [10]*:

$$(1.1) \quad \lambda \geq \lambda_* = \frac{4\pi G}{\rho g};$$

$$(1.2) \quad a_0 \geq a_* = \frac{\sigma_s}{\rho g};$$

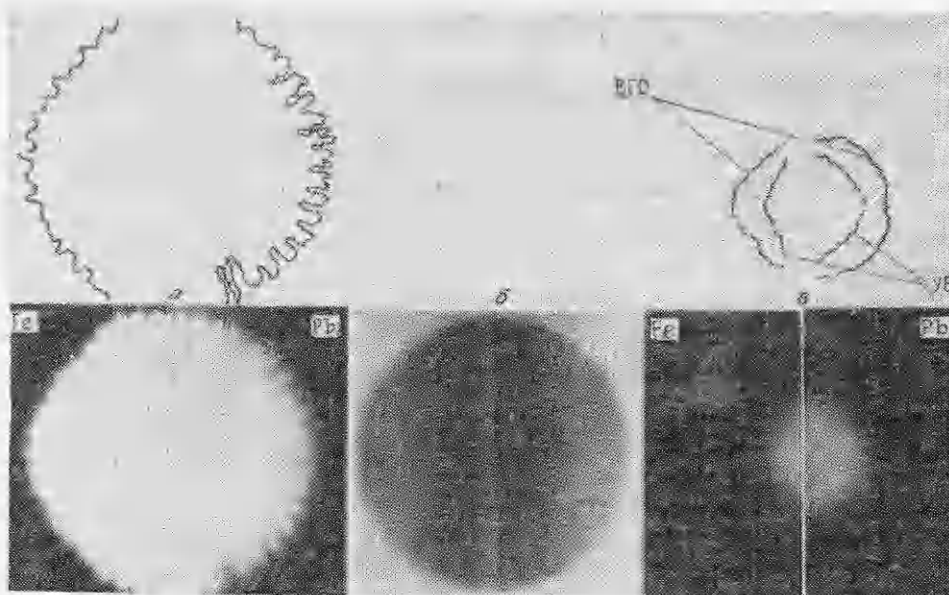
$$(1.3) \quad a_0 \geq a_* = \frac{\sigma_s}{\rho g} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_*}\right).$$

Здесь g — ускорение; G — модуль сдвига; σ_s — динамический предел текучести.

Обычно выделяют три стадии развития РТ-неустойчивости. На первой стадии возмущения на неустойчивой границе растут экспоненциально, на второй их рост замедляется с переходом на степенной закон. Заключительная стадия связана с образованием зоны турбулентного перемешивания (ЗТП). Если остановиться на первой стадии РТ-неустойчивости, поскольку она в конечном счете и будет определять максимально возможное количество материала оболочки, вовлеченного в ЗТП, то на этой стадии возмущения на ВГО, близкие к синусоидальной форме, растут по закону $a(t) = a_0 \exp \beta t$

[2], где $\beta = \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} g \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{1/2}$ — инкремент нарастания возмущений, ρ_1, ρ_2 — плотности материала оболочки и среды. Как видно из этой зависимости, амплитуда возмущений растет пропорционально начальному уровню асимметрии на ВГО и тем быстрее, чем короче длина волны возмущений. Поскольку, как следует из [1], у более прочной стальной оболочки амплитуда возмущений в 1,5 раза меньше, чем у оболочки из свинца, то можно заключить, что сдвиговая прочность материала оболочки при ее торможении

*Выражение (1.3) является упрощенным вариантом формулы (31) из [10].



Р и с. 1

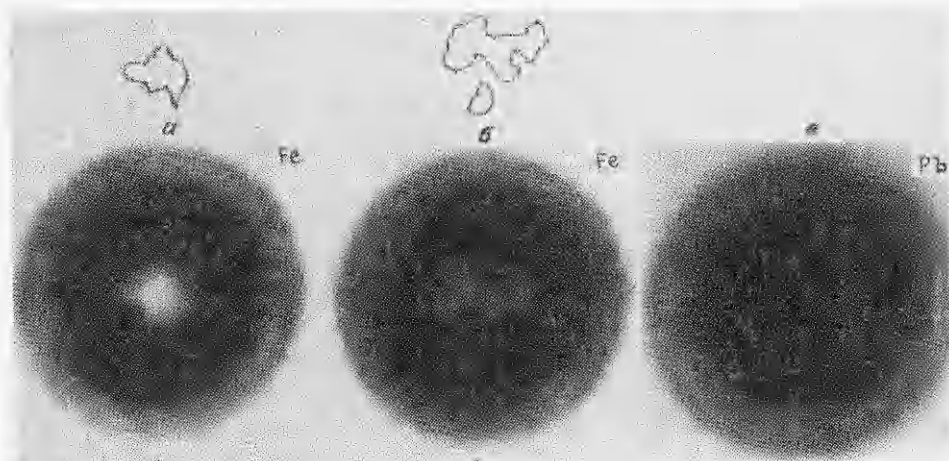
будет оказывать стабилизирующее действие на рост возмущений, а значит, и ограничивать количество материала оболочки, вовлекаемого в ЗТП.

2. С целью экспериментальной проверки этого прогноза проведены опыты с оболочками из стали и свинца, отличающимися по величине сдвиговой прочности более чем на порядок.

Схема разреза экспериментального устройства приведена в [1]. Детерминированные возмущения, как и в [1], обусловлены многоточечным инициированием заряда ВВ. В отличие от опытов, описанных в [1], в данных экспериментах исследовалось влияние на процесс схождения и разлета ВГО наличия в полости оболочек сплошного цилиндра из пенопласта с начальной плотностью $\rho_0 = 0,312 \text{ г/см}^3$. Такой цилиндр устанавливался соосно с оболочками заряда и имел радиус $0,2R_+$ ($R_+ = 150 \text{ мм}$ — наружный радиус заряда ВВ). Импульсное рентгенографирование формы ВГО осуществлялось на подлетной и на разлетной стадиях движения оболочек к оси симметрии.

На рис. 1 приведены фотоснимки рентгенограмм опытов на подлетной стадии движения оболочек из стали и свинца (*а* — форма ВГО при их подлете к радиусу $\sim 0,2R_+$, соответствующая интервалу времени от начала движения ВГО до момента рентгенографирования $t = 23,08 \text{ мкс}$ для стали и $23,18 \text{ мкс}$ для свинца; *б* — цилиндр из пенопласта с наружным радиусом $0,2R_+$; *в* — форма ВГО при схождении на пенопласте к радиусу $\sim 0,1R_+$, отвечающая интервалам времени $t = 27,5 \text{ мкс}$ для стали и $27,2 \text{ мкс}$ для свинца).

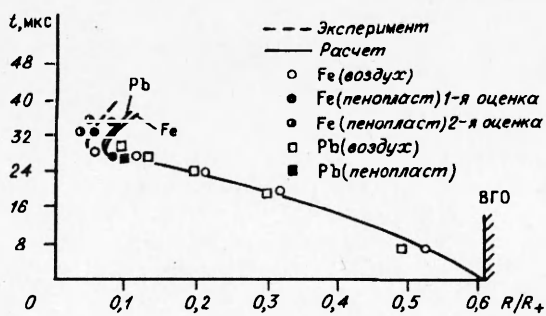
На рис. 2 приведены фотоснимки рентгенограмм опытов на разлетной стадии движения ВГО из стали (*а* — $t = 33,27 \text{ мкс}$; *б* — $t = 35,25 \text{ мкс}$) и свинца (*в* — $t = 35,30 \text{ мкс}$). На рис. 2 показаны контуры ВГО, полученные при математической обработке изображений с помощью ЭВМ. На рис. 3 представлены расчетные $R-t$ -диаграммы движения ВГО. Численные одномерные расчеты выполнены в гидродинамическом приближении. Здесь же нанесены экспериментальные точки из [1]. Поскольку на разлетной стадии движения положение ВГО указать сложнее, то даны две крайние оценки. Первая сделана, как и в [1], по максимальному радиусу, а вторая — по эффективному радиусу площади контура, выделенного при математической обработке изображения.



Р и с. 2

Из рис. 1 и 3 следует, что на подлетной стадии движения оболочек наличие пенопласта приводит к некоторой симметризации ВГО и практически не сказывается на их динамике (по крайней мере, на участке движения от радиуса $0,2R_+$ до $0,09R_+$). Впереди оболочек явно просматривается зона пенопласта, сжатого ударной волной (УВ). На разлетной стадии движения оболочки из стали (рис. 2, а, б) первоначально симметричная форма ВГО теряет устойчивость и материал оболочки перемешивается с пенопластом. Для оболочки из свинца характер поведения, по-видимому, тот же, но из-за меньшей сдвиговой прочности происходит более интенсивное перемешивание, и для интервала $t = 35,30$ мкс выделить контур ВГО уже практически невозможно (рис. 2, в).

3. Представляет интерес проследить за областями устойчивости возмущений на оболочках из стали и свинца с использованием критериев (1.1) — (1.3). Для оценок критериальных величин брали значения сдвига для стали и свинца 77 и 7 ГПа и динамического предела текучести 1,4 и 0,09 ГПа соответственно с учетом его зависимости от скорости деформации [11—13]. Заметим, что экспериментальные точки в целом непротиворечиво укладываются на расчетную диаграмму движения оболочек (рис. 3). Это дает основание использовать в оценках значения ускорений ВГО на разлетной стадии движения, взятые из расчетов. Для стали и свинца они примерно одинаковые ($g = 4 \cdot 10^{10}$ см/с²). С учетом этого на рис. 4 приведены графически результаты проделанных оценок, где области устойчивости для оболочек из стали и свинца заштрихованы и соответствуют формулам (1.1) — (1.3) (а — в). Из рис. 4 видно, что области устойчивости для возмущений на оболочках из менее прочного свинца значительно уже, что свидетельствует о стабилизирующем влиянии сдвиговой прочности на развитие гравитационной

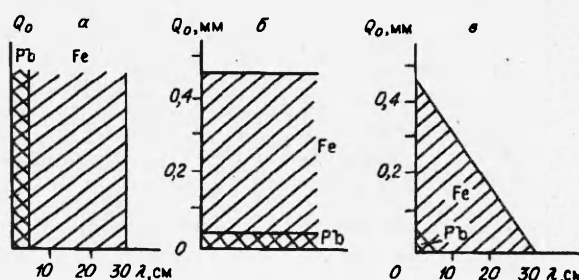


Р и с. 3

неустойчивости и не противоречит эксперименту (см. рис. 2). Из опытов со стальными оболочками следует, что $\lambda < \lambda_*$, но $a_0 > a_*$ ($a_0 \geq 1$ мм) и возмущенные границы качественно находятся в неустойчивой области по [8, 10].

Таким образом, показано, что при торможении оболочек с детерминированными возмущениями они могут терять устойчивость. При этом опреде-

Р и с. 4



ляющей величиной является амплитуда возмущений, которая изначально зависит от сдвиговой прочности материала оболочки. Тем самым подтверждено, что сдвиговая прочность материала оболочки препятствует потере ею устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.Г., Лавровский Ю.Д., Огородников В.А. Некоторые случаи развития детерминированных возмущений на сходящихся оболочках // ПМТФ. — 1992. — № 5.
2. Legend M. Interface instabilities occurring during an explosive driven implosion. Shock compression of condensed matter // American Physical Society Topical Conference, Williamsburg, 1991: Proc. — Amsterdam a.o.: North—Holland, 1992. — P. 361—364.
3. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // Proc. Roy. Soc. — 1950. — V. 201, N 1065.
4. Barnes J.F., Blewitt P.J., McQueen R.G. et al. Taylor instability in solids // J. Appl. Phys. — 1974. — V. 43, N 2.
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.
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.
7. Mills J.F. Taylor instability of a flat plate. — S.l., 1960. — (General Atomics Rep.; GAMD — 7335).
8. Друккер Д. “Тейлоровская неустойчивость” поверхности упругопластической пластины // Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. — М.: Мир, 1983.
9. Бахрах С.М., Ковалев И.П. Неустойчивость Тейлора в упругопластических средах // Материалы V Всесоюз. конф. по численным методам решения задач теории упругости и пластичности. — Новосибирск, 1978.
10. Низовцев П.Н., Раевский В.А. Приближенное аналитическое решение задачи о рэлей-тейлоровской неустойчивости в прочных средах // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. — 1991. — Вып. 3.
11. Борисевич В.К., Сабелькин В.П., Солодянкин С.Н. и др. Динамические характеристики некоторых металлов и сплавов // Импульсная обработка металлов давлением: Темат. сб. науч. тр. / Харьк. авиац. ин-т. — 1981. — Вып. 9.
12. Malatynski M., Klepaczko J. Experimental investigation of plastic properties of lead over a wide range of strain rates // Intern. J. Mech. Sci. — 1980. — V. 22, N 3.
13. Огородников В.А., Иванов А.Г. Особенности откольного разрушения пластин при синхронном инициировании заряда ВВ в нескольких точках // ФГВ. — 1984. — № 3.

г. Арзамас-16

Поступила 25/1 1993 г.,
в окончательном варианте — 7/V 1993 г.