

03;05

## Волнообразование при высокоскоростном соударении пластины с конусом

© Б.А. Бойко, А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 3 мая 2007 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований волнообразования в контактном расплавленном слое при осевом соударении металлических пластин с металлическими телами в виде усеченных прямых круговых конусов. При этом на наружных поверхностях медных и алюминиевых конусов была сформирована замкнутая регулярная структура контактного слоя в виде серии (цуга) длинных волн. Результаты измерения длины волны в зависимости от групповой скорости ложатся на возрастающую ветвь закона дисперсии для волны.

PACS: 47.20.-k, 81.20.Vj.

Явление образования волн в контактных слоях при высокоскоростных соударениях металлических тел изучается уже давно как в фундаментальных исследованиях, например, для анализа гидродинамической неустойчивости вязко-пластического течения в контактных расплавленных слоях в зоне соударения, так и в технических приложениях, например в технологии плакирования и сварки взрывом [1–4]. Изучение волн, образующихся на контактной поверхности металлических экранов при высокоскоростном соударении с телом, важно для разработки эффективной защиты космических объектов от ударов метеоритов. В значительной мере интерес к волнообразованию обусловлен возможностью изучения волновых явлений с точки зрения общей теории волн, поскольку контактный слой является средой, в которой в полной мере проявляются эффекты дисперсии и нелинейности. Такие волны можно наблюдать во время и после соударения, и их форма несет информацию о стадиях эволюции контактных слоев.

До сих пор волнообразование исследовали только при косом соударении плоских пластин, когда углы соударения острые и значительно ограничены ( $\gamma \leq 20^\circ$ ), а длины образующихся волн малы ( $\lambda \leq 1$  mm) и определяются капиллярным натяжением поверхности контакта. При этом, как известно [5], закон дисперсии фазовой и групповой скоростей капиллярных волн определяется убывающими ветвями зависимости  $v_{ph}(\lambda)$  и  $v_{gr}(\lambda)$ .

Еще одной особенностью соударяющихся плоских пластин является существенное влияние их краев, усложняющих волновую картину.

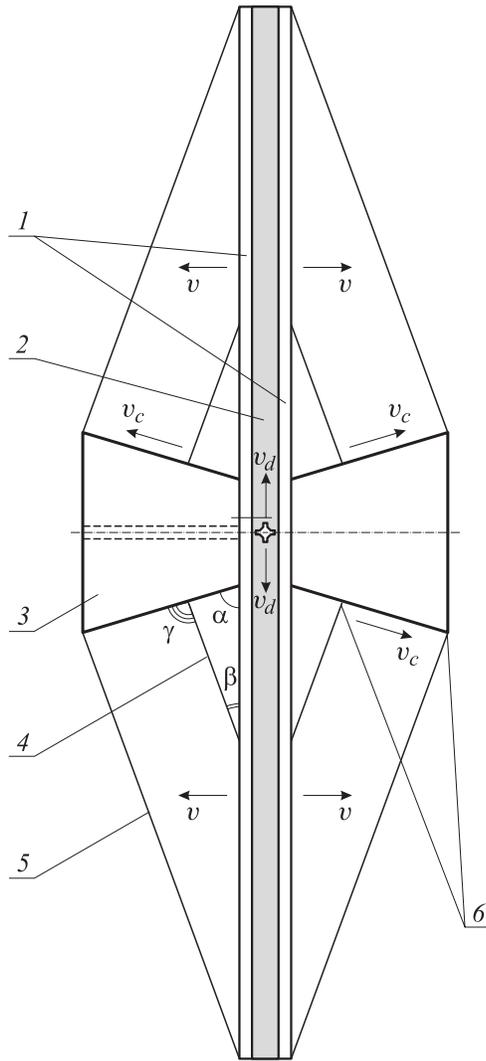
В связи с этим представляет интерес продвижение в область больших (даже тупых) углов соударений и больших длин волн ( $\lambda \geq 1$  mm), когда волнообразование развивается по возрастающей ветви зависимости  $v_{gr}(\lambda)$ , а также исключение краевых искажений волновой картины за счет формирования волн с замкнутым волновым фронтом. Последнее требование можно обеспечить при

соударении пластины с телом специальной геометрической формы, в частности со стержнем [1].

Ранее нами сообщалось о некоторых результатах экспериментальных исследований волнообразования в контактном проплавленном слое при осевом соударении металлических пластин с металлическими телами в виде усеченных прямых круговых конусов [6–8]. При этом на наружных поверхностях медных и алюминиевых конусов впервые была сформирована замкнутая регулярная структура контактного слоя в виде серии (цуга) длинных волн. В данной работе представлены результаты подробных и всесторонних исследований этого явления.

Схема экспериментов представлена на рис. 1. Между двумя квадратными металлическими пластинами  $I$  помещался заряд бризантного взрывчатого вещества (ВВ)  $2$  на основе пластифицированного гексогена. Снаружи каждой из пластин устанавливался усеченный металлический конус  $3$  так, что основание малого диаметра конуса или вплотную примыкало к пластине в ее центре, или располагалось от нее на расстоянии, равном ее толщине. Оси конусов совпадали и были перпендикулярны плоскости пластин. Около конусов располагались специальные ловушки с песком, обеспечивающие сохранность конусов после эксперимента (на рис. 1 не показаны).

Использовались плоские металлические пластины размером 150–180 и толщиной 1 mm. Заряды ВВ имели размер, совпадающий с размером пластин, и толщину  $\Delta = 2, 4$  и 6 mm. Усеченные конусы имели малый  $d_1 = 30$ –60 mm и большой диаметр  $d_2 = 80$ –120 mm. Для исключения влияния краевых эффектов, связанных с границами пластин и разгрузкой продуктов взрыва на краях пластин, диаметры  $d_2$  конусов всегда выполнялись меньшими размеров металлических пластин и заряда ВВ. Угол  $\alpha$  (рис. 1) между образующей гладкой поверхности конуса  $3$  и пластиной  $I$  в опытах составлял:  $45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$  и  $65^\circ$ . Угол соударения пластины с конусом при этом оказывался тупым и составлял



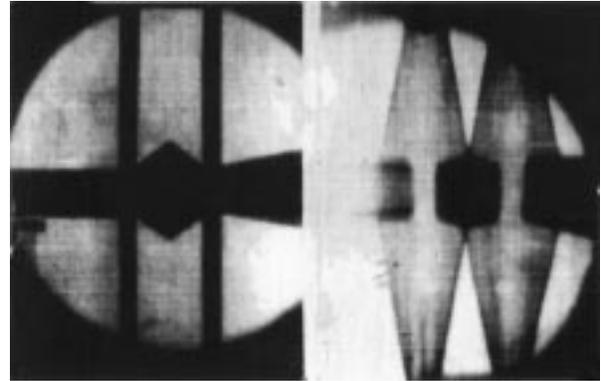
**Рис. 1.** Устройство для исследования волн при соударении пластин с двумя конусами: 1 — металлические пластины в начальном положении (до взрыва); 2 — заряд ВВ; 3 — усеченные металлические конуса ( $d_1$  — малый диаметр,  $d_2$  — большой диаметр); 4 — граница пластины в промежуточной стадии после взрыва; 5 — граница пластины в конце опыта; 6 — точка контакта пластины с конусом;  $\gamma$  — угол соударения пластины с конусом;  $\alpha$  — начальный угол между пластиной и конусом;  $\beta$  — угол разворота пластины под действием продуктов взрыва;  $v_d$  — скорость скользящей детонации по ВВ;  $v$  — скорость пластины под действием давления продуктов взрыва;  $v_c(\lambda) \approx v_{gr}(\lambda)$  — скорость точки контакта.

$\gamma = \alpha + \beta$ , где  $\beta = \arctg(v/v_d)$  — угол разворота пластины под действием продуктов взрыва,  $v$  — скорость движения пластины (скорость  $v$  зависит от отношения массы пластины к массе ВВ [9]),  $v_d$  — скорость детонации. В наших экспериментах скорость пластины  $v$  могла варьироваться в пределах 1–4 км/с. Скорость перемещения точки контакта  $v_c$  можно вычислить по формуле  $v_c = v/\sin \alpha$ . В качестве материалов пластин и конусов применялись пары: медь–медь (Cu–Cu),

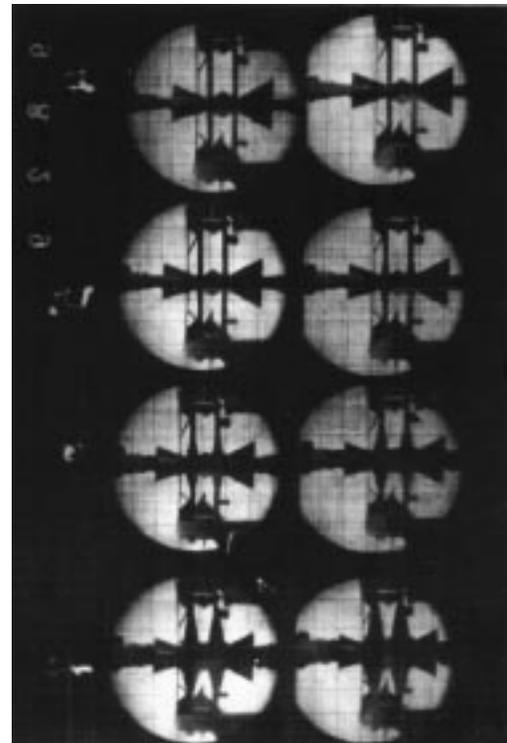
алюминий–алюминий (Al–Al) и др. Заряд ВВ инициировался в центре.

Для регистрации динамики соударения и волнообразования в опытах использовались импульсное рентгенографирование (рис. 2, интервал между кадрами  $14.5 \pm 0.3 \mu\text{s}$ ) и сверхскоростная фоторегистрация в режиме лупы времени (рис. 3, интервал между кадрами  $2 \mu\text{s}$ ).

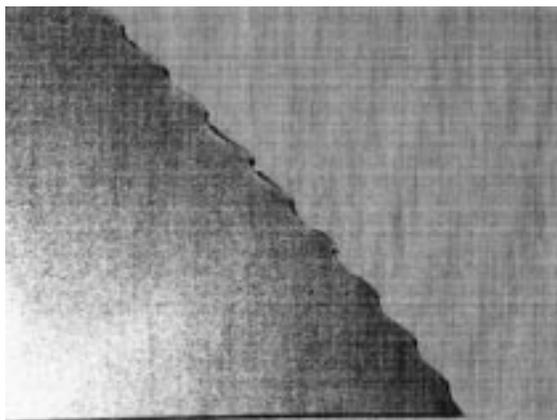
Состояние границы раздела слоев металла после экспериментального нагружения исследовалось в плоских пластинах (рис. 4), которые вырезались из конусов (рис. 5, 6), сохраненных в ловушке. Место, где вырезана пластина (рис. 4), указано пунктирными линиями на



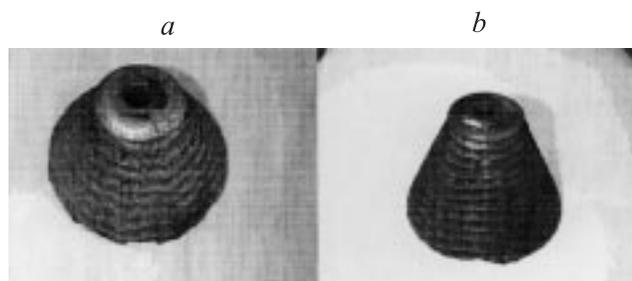
**Рис. 2.** Рентгенограммы процессов соударения в сборке пластин и конусов (интервал между кадрами  $14.5 \pm 0.3 \mu\text{s}$ ).



**Рис. 3.** Сверхскоростная фоторегистрограмма процессов соударения в сборке пластин и конусов в режиме лупы времени (интервал между кадрами  $2 \mu\text{s}$ ).



**Рис. 4.** Фотография плоской пластины, вырезанной из конуса после эксперимента (сталь Ст. 3).

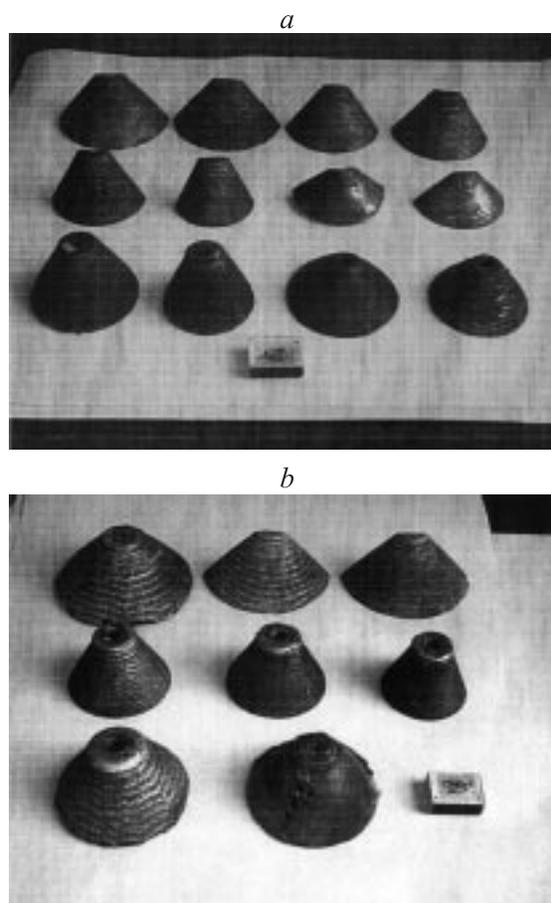


**Рис. 5.** Фотографии отдельных конусов после высокоскоростного соударения с пластинами: *a*) алюминиевый конус после удара алюминиевой пластины; *b*) медный конус после удара медной пластины.

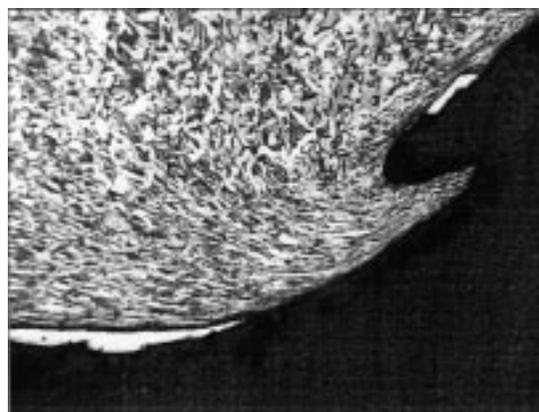
левом конусе на рис. 1. Для исследования структуры контактного слоя пластины шлифовались и полировались до зеркального блеска. После травления микроструктура металла в контактной области шлифа изучалась под микроскопом (рис. 7). Эти исследования позволили определить глубину проплавления металла и показали нелинейный характер волны (укручение гребней).

В процессе соударения пластины с конусом значительное количество кинетической энергии пластины выделяется в форме тепла. Внутри металла 80–90% тепловой энергии обусловлено переходом в тепло энергии пластической деформации и лишь 10–20% выделяется при упругом сжатии металла в процессе прохождения ударных волн. В результате кратковременного ( $\approx 10^{-6}$  s) динамического воздействия на контактной границе соударяющихся металлов развиваются интенсивные пластические деформации, приводящие к разогреву и термическому разупорядочению небольшого по толщине приграничного слоя металла. На границе контакта металлов за счет трения их поверхностней дополнительно выделяется некоторое количество теплоты, что приводит к расплавлению металлов в приграничной зоне с последующим застыванием. Поэтому на внешней волнообразной поверхности конусов, сохраняемых после взрыва (см.

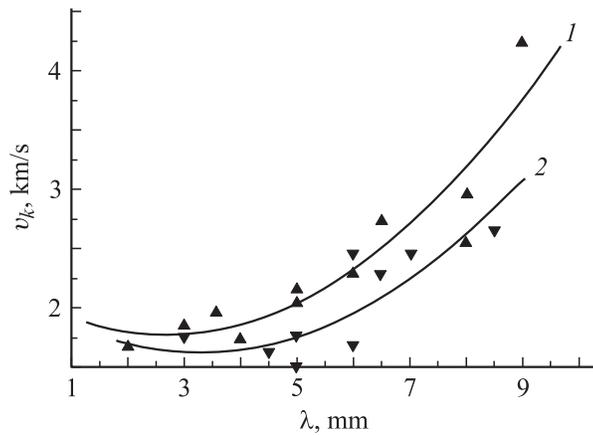
рис. 5 и 6), отчетливо видны оплавленные и застывшие волновые образования. Влияние вязкости металла на количество выделяемого тепла существенно зависит от величины давления и температуры. Это затрудняет теоретическое определение температурных полей.



**Рис. 6.** Фотографии наборов конусов после высокоскоростного соударения с пластинами: *a*) алюминиевые конусы после удара алюминиевых пластин; *b*) медные конусы после удара медных пластин.



**Рис. 7.** Фотография шлица стального образца (увеличено в 200 раз), показывающая глубину проплавления металла после удара медной пластины.



**Рис. 8.** Возрастающий закон дисперсии групповой скорости ( $v_c(\lambda) \approx v_{gr}(\lambda)$ ) при увеличении длины волны  $\lambda$ : 1 — Al—Al; 2 — Cu—Cu.

Толщину  $I$  разогретого разупорядоченного слоя можно оценить из соотношения  $I \approx (\tau\theta)^{1/2}$ , где  $\tau$  — время теплового воздействия;  $\theta$  — коэффициент температуропроводности. По-видимому, в первые моменты после соударения пластины с конусом, когда металл нагрет в узкой области около границы до высокой температуры, происходит быстрое зародышеобразование. Скорость образования зародышей рекристаллизации стимулируется высокой скоростью и степенью пластической деформации. Деформация вблизи локальной зоны контакта носит турбулентный характер, что и обуславливает высокую плотность зародышей рекристаллизации и образование мелкозернистой структуры. Вследствие быстрого выравнивания температуры сам процесс рекристаллизации происходит уже при сравнительно низких температурах, достаточных для протекания процесса роста зародышей, но недостаточных для образования их в других областях металла. Это приводит к появлению резкой границы с остальной частью металла. Вследствие высокой температуропроводности металлов происходит быстрое выравнивание температур. Через  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  с после соударения распределение температуры по всему сечению контактного слоя будет практически равномерным.

Измерялась амплитуда  $a$  и длина волны  $\lambda$  в продольном к движению точки контакта направлении, а также изучался профиль переднего и заднего фронта продольных волн. На поверхности алюминиевых конусов волны имеют синусоидальную форму с симметрично расположенными передним и задним фронтами. С увеличением скорости точки контакта гребни волн на поверхности медных конусов деформируются в направлении движения пластины, а форма волн становится асимметричной. В ряде случаев деформация волн приводит к отрыву гребней волн и их сносу, что, по-видимому, связано с увеличением тангенциальной составляющей скорости движения пластины и появлением тангенциального разрыва между соударяющимися металлами

пластины и конуса. Длина волны  $\lambda$  определялась как средняя величина расстояния между гребнями на базе 10 периодов. Говоря о длине волны деформации  $\lambda$ , нельзя не учитывать эволюцию течения по длине образующей конуса. Как и при течении в каналах, выделялся начальный участок и участок гидродинамической стабилизации. Участок стабилизации определялся по таким интегральным параметрам, как средняя длина волны или средняя амплитуда волны. Для набора статистики значительная часть серии опытов проводилась при одинаковых начальных параметрах с обеих сторон от заряда ВВ: одинаковые материал и угол конусов, одинаковые материал и угол  $\beta$  пластин, одинаковый материал пластин и конусов. Важно отметить, что выход на стабилизированный волновой режим определялся не толщиной пластины, а другим линейным масштабом (по-видимому, толщиной волнового течения). По этой причине стабилизация волновых режимов происходила на малых удалениях ( $\lambda - 3\lambda$ ) от малого основания конуса. Таким образом, при рассмотрении волнового режима отмечалась эволюционность волнового течения и учитывались реальные размеры конуса.

Было проведено около ста опытов. Накопленный материал позволил построить зависимость  $v_c(\lambda) \approx v_{gr}(\lambda)$  (рис. 8), из которой, в частности, следует, что в наших экспериментах реализовано волнообразование, которое развивается по возрастающей ветви зависимости  $n_{gr}(\lambda)$ . Полученные режимы в совокупности с возможностью продвигения в область больших углов соударений  $\gamma$  (тупых углов) и исключением влияния краевых эффектов на волновую картину позволяют утверждать, что в данной работе развита новая методика изучения волновых явлений при высокоинтенсивных импульсных процессах.

## Список литературы

- [1] Волнообразование при косых соударениях. Сб. статей. Новосибирск: Изд-во ин-та дискр. мат. и инф., 2000. 221 с.
- [2] Гордолов Ю.А., Дремин А.Н., Михайлов А.Н. // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 10. № 2. С. 288–291.
- [3] Годунов С.К., Дерibas А.А., Козин Н.С. // ПМТФ. 1971. № 3. С. 63–72.
- [4] Дреннов О.Б., Михайлов А.Л., Низовцев П.Н., Раевский В.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 62–70.
- [5] Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 256 с.
- [6] Бойко Б.А., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // ПТЭ. 2004. № 5. С. 135.
- [7] Бойко Б.А., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // ДАН. 2004. Т. 399. № 3. С. 339.
- [8] Boyko B.A., Dubinov A.E., Selemir V.D. // Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Berlin, 2004. P. 109.
- [9] Биченков Е.И., Лобанов В.А. // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 2. С. 292–294.