

## ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ МЕТАНИИ ПЛАСТИНЫ НИЗКОСКОРОСТНЫМИ ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Ю. П. Бесшапошников, В. Е. Кожевников, В. И. Чернухин, В. В. Пай\*

Уралхиммаш, 620010 Екатеринбург, liom@ekb.ru

\*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано метание пластин скользящей детонационной волной при значениях скорости детонации  $\approx 950 \div 2000$  м/с. Обнаружено, что в процессе полета пластины, изготовленной из достаточно прочного материала, на ее поверхности появляются регулярные упругие волны, которые исчезают при достижении верхнего предела по скорости детонации.

Для решения задач поведения материалов при взрывной нагрузке применительно к сварке, упрочнению и компактированию с помощью метания плоского ударника (пластины) скользящей детонационной волной, обычно применяют расчеты, в которых прочностные свойства материала не учитываются. Данный подход для большинства случаев вполне оправдан с точки зрения упрощения расчетной модели и экспериментально обоснован при скоростях детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ)  $D \gtrsim 2000$  м/с [1]. Однако, например, при сварке взрывом материалов, склонных к образованию друг с другом интерметаллидов, либо сильно различающихся температурой плавления, либо образующих легкоплавкие эвтектики, оптимальные значения  $D$  могут быть существенно ниже 2000 м/с [2–4]. Но в то же время при достаточно низких значениях  $D$  давление на поверхности метаемой пластины со стороны продуктов взрыва может быть сравнимо с динамическим пределом прочности материала пластины и, естественно, возникает вопрос о влиянии прочности материала на геометрию метания пластины, а следовательно, и на кинематические параметры. Поэтому определение минимальных (граничных) значений  $D$ , при которых еще оправдана применимость расчетных моделей, не учитывающих прочность нагружаемого взрывом материала, — важная прикладная задача.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования профиля пластины в процессе ее свободного метания скользящей детонационной волной при значениях скорости детонации  $D \approx 950 \div 2000$  м/с. Эксперименты проводили с пласти-

нами, выполненными из стали марок Ст. 3, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, титана ВТ1-0, хастеллоя ХН65МВ, меди М1, алюминия АД0 и свинца С1, с использованием известной реостатной методики [5] по схеме, представленной на рис. 1. Под пластиной, на которой находился слой ВВ, с помощью специального изолятора закрепляли отрезок нихромовой проволоки (реостатный датчик) диаметром 0,1 мм под некоторым углом  $\alpha$  к пластине. В «точке»  $O$  проволока находилась в электрическом контакте с пластиной. В некоторых случаях «точка»  $O$  изолировалась тонкой прокладкой из фторопласта толщиной 0,03 мм, что позволяло на осциллограмме более четко зафиксировать начало процесса в виде ступеньки. Ступеньку обеспечивала небольшая петля из нихромовой проволоки, соединенная одним концом с датчиком в «точке»  $O$ , другим — с заземленной пластиной. На пластине под слоем ВВ размещали контактные датчики для из-

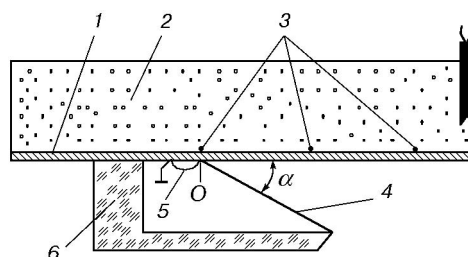


Рис. 1. Схема экспериментального исследования профиля метания пластины:

1 — метаемая пластина, 2 — ВВ, 3 — контактные датчики для измерения скорости детонации, 4 — датчик из нихромовой проволоки, 5 — петля для фиксации начала процесса, 6 — изолятор

Результаты экспериментального исследования профиля пластины

Номер опыта	Материал пластины и ее размеры [мм]	Предел текучести материала пластины*, МПа	Толщина заряда, мм	Скорость детонации, м/с	Давление на фронте детонации**, МПа	Параметры волн на поверхности пластины, мм		
						длина	высота	
1	Сталь 08X18H10T, 450 × 300 × 1	302	40	950	301	10,40	0,15	
2	Алюминий АД0, 450 × 350 × 5	58	40	1000	333	Волны не обнаружены		
3	Хастеллой ХН65МВ, 500 × 300 × 4	579	40	1090	396	13,50	0,34	
4	Титан ВТ1-0, 400 × 250 × 2	407	40	1095	400	9,00	0,20	
5	Сталь Ст. 3	450 × 300 × 3	287	60	1000	333	15,55	0,39
6		450 × 300 × 3	287	40	1040	360	7,00	0,23
7		450 × 300 × 3	287	40	1120	347	9,00	0,33
8		450 × 300 × 3	287	40	1125	350	12,60	0,45
9		450 × 300 × 2	287	40	1150	366	7,25	0,35
10		450 × 300 × 3	287	60	1300	563	Волны не обнаружены	
11		450 × 300 × 3	287	60	1430	682	—//—	
12		450 × 300 × 3	287	22	1600	800	10,0***	0,15***
13		480 × 300 × 3	287	15	1900	876	Волны не обнаружены	
14	Сталь 10X17H13M2T, 500 × 300 × 5	351	65	1440	691	—//—		
15	Медь М1, 450 × 300 × 3	122	45	1300	563	—//—		
16	Свинец С1, 450 × 300	5	40	1255	521	—//—		

Примечания. \*Измерено стандартным методом.

\*\*Расчет выполнен по формуле  $p = \rho D^2 / (k + 1)$ , где  $p$  — давление на фронте детонации,  $\rho$  — плотность заряда ВВ,  $D$  — скорость детонации,  $k$  — интегральный (эффективный) показатель политропы, определенный по методике [1, 5].

\*\*\*Волны нанесены на поверхность пластины искусственным путем.

мерения скорости детонации. В качестве хронометра при этом использовали частотомеры ЧЗ-34 (ЧЗ-35). В процессе метания пластина налетала на нихромовый датчик и длина той его части, которая еще не соприкоснулась с пластиной, уменьшалась с течением времени. Естественно, пропорционально этой длине уменьшалось электрическое сопротивление, которое измеряли по схеме, представленной на рис. 2. Через сопротивление реостатного датчика пропускали импульс тока (0,25 ÷ 0,5 А) длительностью 200 мкс, формировавшийся ге-

нератором тока. На концах датчика возникало падение напряжения, его регистрировали с помощью цифрового осциллографа С9-8. Ток, протекающий через датчик, в течение всего процесса регистрации оставался постоянным, и, следовательно, падение напряжения на нем было пропорционально сопротивлению, что упрощало процедуру обработки получаемых осциллограмм. С особой тщательностью подбирался угол датчика  $\alpha$ , поскольку при метании пластин низкоскоростными ВВ ( $D < 1500$  м/с) сложнее соблюсти условие

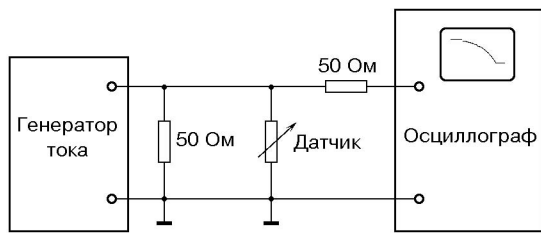


Рис. 2. Схема измерения сопротивления реостатного датчика

устойчивости датчика, которое обеспечивается тем, что угол  $\alpha$  выбирается очень близким к предельному углу поворота  $\beta$ . Только в этом случае скорость точки контакта «пластина — датчик» превышает скорость звука в материале датчика. Понятно, что, если угол  $\alpha$  оказывается меньше предельного угла  $\beta$ , существенная и самая важная часть полезного сигнала не регистрируется.

В опытах было обнаружено, что для достаточно прочных материалов (Ст. 3, 08X18H10T, ВТ1-0, ХН65МВ) при  $D \approx 950 \div 1150$  м/с на поверхности пластины появляются регулярные волны длиной  $7 \div 15$  мм и высотой  $0,15 \div 0,45$  мм (см. таблицу). Данный эффект, очевидно, связан с упругими свойствами материала пластин [6, 7], поскольку по завершении процесса метания волны исчезали (их следов на пластине не обнаружено). Однако, когда метали пластину из алюминия в интервале тех же значений  $D$  (опыт № 2), волны не наблюдались (осциллограмма процесса выглядит гладкой). Вероятно, давление на фронте детонации даже при таких низких значениях  $D$  не позволяет упругим свойствам проявиться в алюминии в достаточной мере.

Более детально было исследовано метание пластин из стали Ст. 3. Для них установлен верхний предел по скорости детонации ( $D_{lim} \approx 1300$  м/с), при достижении которого волны исчезают. На рис. 3 представлены осциллограммы трех характерных экспериментов, которые наглядно иллюстрируют обнаруженный эффект.

Для подтверждения вывода относительно эффекта появления упругих волн при низкоскоростном метании и проверки возможностей реостатной методики в плане регистрации подобных волн были проведены дополнительные эксперименты по метанию пластин, у которых поверхность, соударяющаяся с реостатным датчиком, на стадии подготовки экспери-

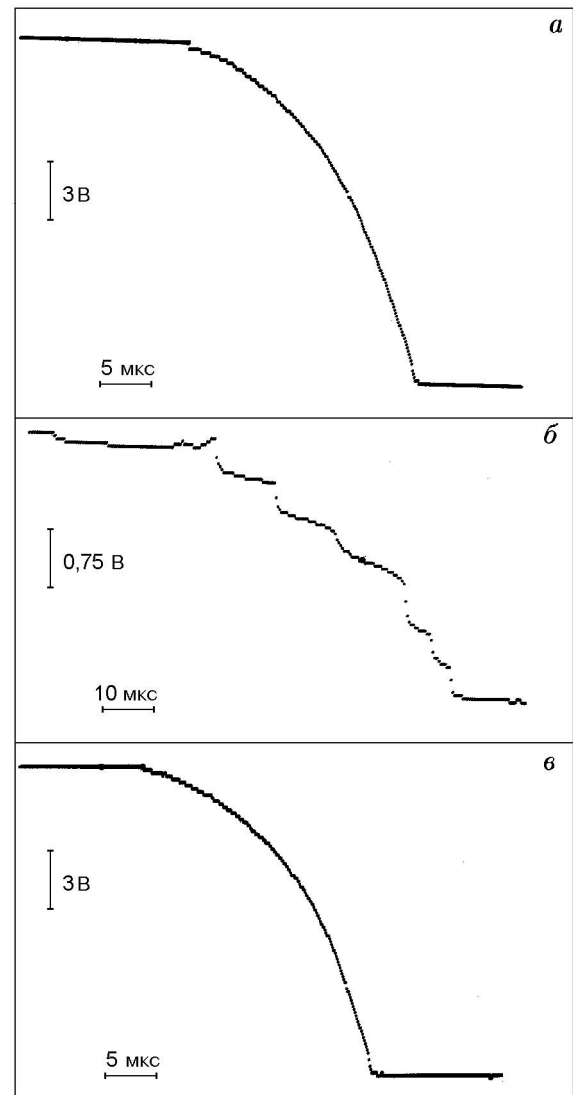


Рис. 3. Осциллограммы профиля метания:

а — стальная пластина (Ст. 3) толщиной  $\delta = 3$  мм, заряд ВВ толщиной  $H = 60$  мм,  $D = 1300$  м/с (на поверхности пластины волн нет); б — Ст. 3,  $\delta = 3$  мм,  $H = 60$  мм,  $D = 1000$  м/с (волны есть); в — алюминиевая пластина (АД0),  $\delta = 5$  мм,  $H = 40$  мм,  $D = 1000$  м/с (волн нет)

мента выполнялась волнообразной. Волны (борозды) имели поперечную ориентацию относительно направления скорости детонации. Длина волны 10 мм, высота волны  $0,15 \div 0,20$  мм. Режим метания указан в таблице (опыт № 12). Поскольку целью этих экспериментов являлось получение волнообразной осциллограммы как следствия заведомо волнообразной поверхности пластины, а не получение численных значений, для регистрации сигнала использовали аналоговый осциллограф типа С1-74. В этом случае неровности на осциллограмме легче себя

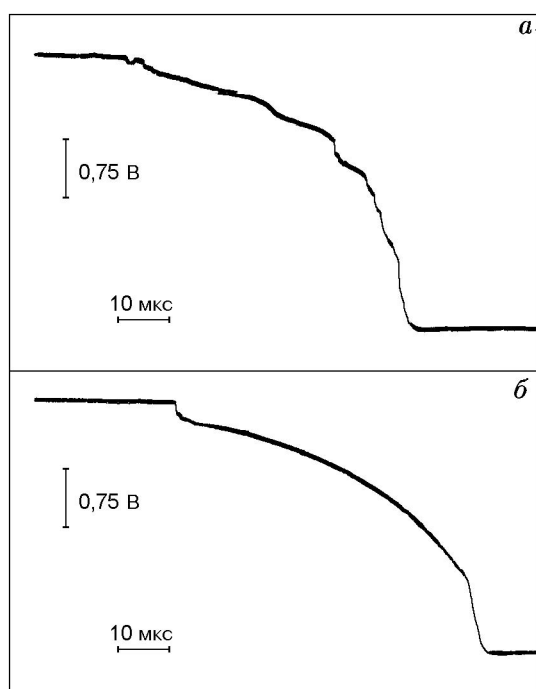


Рис. 4. Осциллограммы профиля метания стальной пластины:

*а* — с искусственно нанесенными бороздами на поверхности; *б* — с гладкой поверхностью

обнаруживают, а точность измерения принципиального значения не имеет. Осциллограмма метания показана на рис. 4 в сравнении с осциллограммой метания гладкой пластины. Из осциллограмм видно, что реостатная методика обладает довольно высокой разрешающей способностью и позволяет «видеть» волнообразные неровности высотой, близкой к диаметру нихромовой проволоки. Таким образом, волнообразность осциллограмм можно объяснить только возникновением волн на поверхности пластин в момент их разгона, а не особенностями измерительной аппаратуры. Следовательно, «эффект упругих волн» можно считать установленным фактом.

В заключение отметим, что при сварке взрывом металлов с сильно различающимися прочностными свойствами (например, алюми-

ний и сталь, свинец и сталь) и со скоростью детонации значительно меньше 2000 м/с в качестве метаемого элемента, очевидно, лучше использовать пластину из менее прочного материала, чтобы избежать проявления указанного эффекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бесшапошников Ю. П., Кожевников В. Е., Чернухин В. И., Пай В. В.** Метание пластин слоями смесевых ВВ // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 129–132.
2. **Кожевников В. Е.** Определение практических областей сварки взрывом биметаллов медь+титан, медь+алюминий, титан+алюминий // Обработка материалов импульсными нагрузками: Тематический сб. тр. / СКБ ГИТ, ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1990. С. 236–244.
3. **Otto H. E., Carpenter S. H.** Explosive cladding of large steel plates with lead // Welding J. 1972. V. 51, N 7. P. 7–13.
4. **Лысак В. И., Кузьмин С. В., Седых В. С., Масленникова В. Р.** О взаимосвязи типа металлургического взаимодействия металлов и положения оптимальных границ их сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. Волгоград: ВолгоПИ, 1991. С. 13–21.
5. **Кузьмин Г. Е., Мали В. И., Пай В. В.** О метании плоских пластин слоями конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 4. С. 558–562.
6. **Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д.** Моделирование ударно-волнового деформирования и разрушения материалов // Высокоэнергетическое воздействие на материалы: Сб. тр. 9-й Международной конференции / ИГ, СКБ ГИТ СО АН СССР. Новосибирск, 1986. С. 224–228.
7. **Орлов М. И., Пашуков Ю. Н., Соловьев В. Я.** О математической модели метания идеально-упругой пластины под действием волны детонации, распространяющейся вдоль ее поверхности // Обработка материалов импульсными нагрузками: Тематический сб. тр. / СКБ ГИТ, ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1990. С. 195–202.

Поступила в редакцию 15/XII 2000 г.