

где W_{\max} — скорость истечения продуктов при выходе детонации на свободный торец заряда, определяемая из (2) и (7), км/с; $F(W)$ — медленно меняющаяся (в пределах $(2,5-3,0) \cdot 10^8$) функция от W , определяемая по данным предыдущего расчета, $(\text{кг/см}^3) (\text{км/с})^{10}$; l — толщина метаемой пластины, см.

Итак, в основе проделанного расчета лежат два предположения:

1) при выводе уравнения (18) отождествляются лагранжевы скорости звука и ударного фронта, отраженного от пластины;

2) считается, что значение C_*/D относится к границе раздела ВВ — металл, что, вообще говоря, неверно. Однако анализ уравнения (18) показывает, что эти упрощения вносят в окончательный результат ошибку не более нескольких процентов, что для целей оценки можно считать удовлетворительным.

В заключение автор выражает благодарность С. В. Першину и Г. И. Канелю за полезные дискуссии и ценные советы.

Поступила в редакцию
8/IV 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Рейс, Р. Мак-Куин, Дж. Уолш. — В сб.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
2. Н. А. Фот. Проблемы прочности, 1970, 11.
3. В. О. Lambour, I. E. Harley. Proc. 4-th Sympos. on det., 1965.
4. A. Vidart, P. Beatrix a. o. Proc. 4-th Symposium on detonation, 1965.
5. Ф. А. Баум, К. П. Станюкевич, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
6. J. M. Walsh, R. H. Christian. Phys. Rev., 1955, 97, 1544.
7. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
8. R. MacQueen, S. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7.
9. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.

УДК 621.791.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕТОНАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ТЭНА МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ С ИНЕРТНЫМИ ПРЕГРАДАМИ

А. И. Луковкин, И. И. Сидоров, Е. Г. Карпунов,
В. А. Артемов, В. П. Беляцкий

(Ленинград)

В практике сварки взрывом до настоящего времени не нашла своего удовлетворительного решения весьма актуальная задача внутреннего плакирования отверстий малых диаметров. Для этих целей пригодны лишь высокобризантные взрывчатые вещества с малыми критическими диаметрами, скорость детонации которых обычно лежит выше предела 5500 м/с, т. е. превышает скорость звука во многих известных металлах. Использование таких ВВ для сварки порождает трудноразрешимые проблемы при реализации основных условий взрывного плакирования и главным образом при обеспечении дозвуковых скоростей деформации металлов в окрестности точки физического контакта.

В работах [1—3] авторами была установлена принципиальная возможность соединения металлов сваркой взрывом с помощью высокобризантичных ВВ при плоской схеме установки заготовок и показано, что соединение происходит только при условии достаточно большого динамического угла встречи соединяемых поверхностей. В этом случае, несмотря на сверхзвуковые скорости распространения нагрузки, в зоне соударения реализуются дозвуковые течения и впереди точки контакта может двигаться возмущение, в котором происходят основные процессы очистки и активации поверхностных слоев. Однако рекомендуемые авторами режимы не применимы при внутреннем плакировании отверстий малых диаметров как в силу конструктивных соображений, так и по геометрическим размерам взаимной установки соединяемых поверхностей. Основная идея авторов — использование высокобризантичных ВВ для сварки — может быть реализована и при внутреннем плакировании, если разработать достаточно надежный способ широкого регулирования динамического угла встречи соединяемых поверхностей.

Известны способы регулирования динамического угла встречи посредством расположения соединяемых поверхностей под углом и снижения толщины плакировки при одновременном увеличении соотношения масс ВВ и плакировки. К этим способам может принадлежать также метод, основанный на перераспределении импульса давления по длине заряда. Эффект перераспределения давления может быть достигнут различными способами: чередованием плотности ВВ по длине заряда, применением прослоек из более мощных ВВ на основном заряде, а также созданием различных препятствий для распространения детонации по заряду. Наиболее технологичный способ — размещение в заряде металлических преград перпендикулярно направлению распространения детонации.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению этого важного для практики явления на примере детонации цилиндрических зарядов сыпного тэна.

Заряды изготовлялись из порошкообразного кристаллического тэна. Размеры отдельных кристаллов составляли 0,2—1,0 мм. Насыпная плотность зарядов диаметром 5 и длиной 100—120 мм составляла 0,88—0,93 г/см³. В качестве оболочки для зарядов применялась прозрачная целлофановая трубка с толщиной стенки 0,12—0,16 мм, что позволяло фиксировать свечение фронта детонационной волны.

Исследование распределения скорости детонации по длине заряда в зависимости от толщины и материала преграды производилось с помощью установок СФР. Влияние толщины преграды на процесс возмущения детонации определялось на стальных диафрагмах толщиной 0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм. Кинопанорамы процессов детонации некоторых зарядов приведены на рис. 1. Среднее время полной детонации зарядов составляло 24—32 мкс, при этом усредненная по длине заряда скорость детонации изменялась от 3650 до 4700 м/с. Такое различие обуславливается ацидентивным распределением плотности ВВ по длине заряда, а также недостаточно мощным иницирующим импульсом, что значительно затягивало во времени выход процесса на нормальную детонацию.

На приведенных кинопанорамах хорошо видно влияние преграды на геометрию фронта разлетающихся газов. Фронт в зарядах без преграды имеет форму, близкую к овалу. Преграда вызывает излом на поверхности фронта разлетающихся газов. Утолщение преграды увеличивает период задержки процесса передачи детонации от одной части заряда к другой.

В общем случае изменения процесса детонации зарядов при установке в них преграды могут быть сведены к следующему.

При подходе детонационной волны к преграде процесс прерывается. Давление газообразных продуктов, движущихся по инерции к преграде,

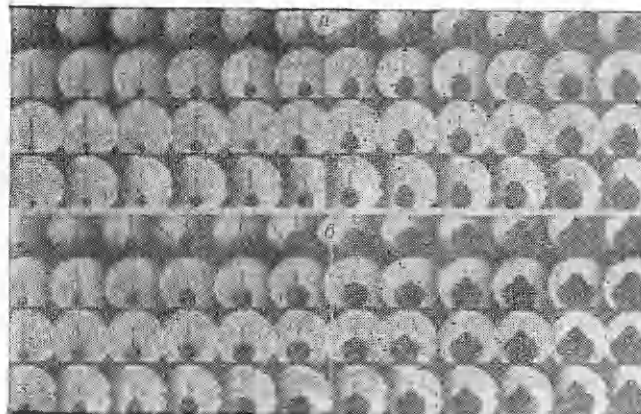


Рис. 1. Кинопанорамы процесса детонации цилиндрических зарядов тэна без преграды (а) и с преградой толщиной 1,5 мм (б) ($d=5$ мм, $l=120$ мм, $\rho=0,88-0,93$ г/см³).

возрастает. Энергия их в этот момент расходуется на преодоление инерционных сил преграды, на инициирование в ее материале ударной волны, а также уносится в окружающую среду, при этом скорость разлета газов в направлении, перпендикулярном оси заряда, возрастает.

Дальнейшее развитие процесса в общем случае возможно посредством возбуждения детонации за преградой интенсивной ударной волной, выходящей из материала преграды в массу ВВ, или посредством огибания преграды фаскаленными газообразными продуктами. Возможен и третий механизм, заключающийся в значительной пробивной силе кумулятивных микроструй, прожигающих преграду [4, 5]. В наших опытах преграды толщиной 0,2—0,4 мм из резины, органического стекла, полиэтилена и фторопласта вообще не дали ощутимого возмущения детонации.

Возбуждение детонации за преградой происходит либо сразу с максимальной скоростью, либо нормальная детонация начинается на некотором расстоянии от границы раздела металл — ВВ. Определяющими моментами при этом являются интенсивность выходящей из преграды ударной волны, а также чувствительность ВВ за преградой. Если ударная волна достаточно слабая, то детонации предшествует стадия химического разложения ВВ, идущего с малой скоростью, которая может заканчиваться затуханием или переходом в детонацию. В настоящих опытах затухания ни в одном из опытов не наблюдалось.

Исследование количественных характеристик возмущения при передаче детонации через металлическую преграду в зависимости от толщины и свойств материала проводилось с помощью СФР в режиме фоторегистратора. Процесс возмущения фиксировался по самосвечению газообразных продуктов.

Контролируемый участок длины заряда, обусловленный возможностью установки, составлял 50 мм. Преграда располагалась в центре этого участка.

Срыв интенсивности свечения на фоторазвертках соответствует моменту выхода фронта детонации к преграде. Возобновление яркого свечения после преграды — признак начала процесса нормальной детонации за преградой.

Обработка экспериментальных данных заключалась в определении усредненных углов наклона следов свечения на фоторазвертках и определения по ним скоростей перемещения свечения, что в известной степени характеризует процесс восстановления нормальной детонации за преградой.

Зависимость основных параметров возмущения детонации цилиндрических зарядов тэна диаметром 5 мм в окрестности металлической преграды от ее толщины и материала

Материал преграды	Толщина преграды, м	Скорость детонации перед преградой, м/с	Скорость перемещения свечения за преградой, м/с	Длина участка восстановления скорости детонации, мм	Период времени от срыва до возобновления детонации, мкс	Скорость детонации после восстановления, м/с
Ст. 3	0,35	6180	2340	2—3	0,9	6100
»	0,35	5040	2160	16	6,0	3900
»	1,0	6000	2700	9—10	3,3	5580
»	2,0	5940	1980/2560	12	4,3	5580
Медь	0,6	6000	2400	4—5	—	5900
»	1,0	5860	1980	10—12	6,0	5820
Алюминий	0,8	5820	2380	2—3	1,4	5220
Молибден	0,8	6000	1860	2—3	1,3	5820
Серебро	0,5	5930	2100	5—7	—	6000

Основные результаты обработки фоторазверток и кинопанорам приведены в таблице. Видно, что существует определенная корреляция между параметрами возмущения детонации и свойствами преграды. Однако, как показали опыты, самое резкое влияние на параметры возмущения оказывает скорость детонации заряда перед преградой.

Так, длина участка заряда с малой скоростью перемещения свечения составляет 16 мм, если скорость детонации до преграды 5040 м/с, и 2—3 мм, если скорость детонации 6180 м/с (при инициировании зарядов со стальными преградами одинаковой толщины 0,35 мм). Резкий срыв и возобновление яркого свечения на фоторазвертке рис. 2, а можно объяснить тем, что выходящая из материала преграды ударная волна была настолько мощная, что процесс оптимальной для данного состояния ВВ детонации начался практически на границе раздела металл — ВВ. В то же время срыв свечения на фоторазвертке рис. 2, б и постепенное нарастание его интенсивности можно объяснить появлением за преградой стадии химического разложения ВВ с малой скоростью перемещения, которая затем переходит в детонацию.

Следовательно, на процесс восстановления нормальной детонации за преградой первостепенное значение имеет интенсивность выходящей из преграды ударной волны, при этом большое значение приобретают условия движения ударной волны в материале преграды (акустическое сопротивление движению ударной волны) и соотношение акустических сопротивлений на границе раздела металл преграды — ВВ за преградой. Можно ожидать, что чем выше акустическое сопротивление материала преграды и чем больше оно акустического сопротивления ВВ за преградой, тем ниже интенсивность инициирующей ударной волны и скорость перемещения свечения за преградами.

Данные таблицы показывают также, что с увеличением толщины преграды скорость перемещения свечения за ней снижается. Исключение составляет фоторазвертка процесса детонации заряда с преградой из стали толщиной 1,0 мм, но это можно объяснить случайной подпрессовкой ВВ перед преградой в момент снаряжения заряда, что привело к зарождению в преграде более мощной ударной волны.

Следует отметить, что восстановление нормальной детонации за преградой, согласно расшифровке фоторазверток, происходит скачкообразно. Однако, учитывая, что диаметры зарядов и преграда равны, можно предположить, что огибающие преграду газы в настоящей поста-

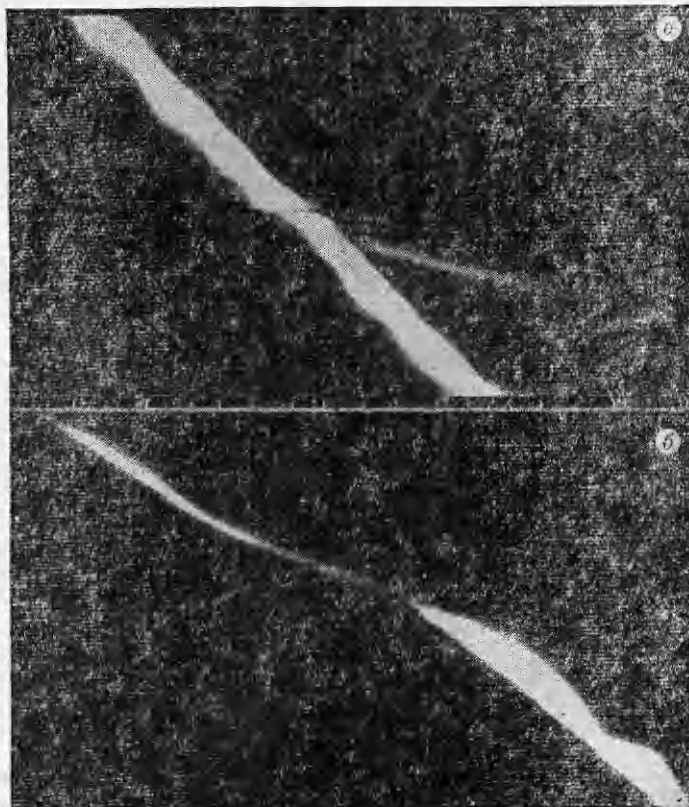


Рис. 2. Влияние скорости детонации заряда до преграды на эффект возмущения процесса детонации в районе установки стальной преграды толщиной 0,35 мм.

а) скорость детонации до преграды 6180 м/с; *б)* скорость детонации до преграды 5040 м/с.

новке экспериментов закрывают от наблюдателя истинную картину происходящих явлений вблизи преграды [6]. В качестве примера, подтверждающего возможность существования такого положения, может служить фоторазвертка процесса детонации заряда с преградой толщиной 2 мм, приведенная на рис. 3.

Второй излом на фоторазвертке за преградой, по-видимому, соответствует моменту обгона фронтом химического разложения ВВ облака светящихся газов. При толщинах преград до 1,0—1,5 мм фоторазвертки процессов детонации имеют один излом за преградой. Это может означать, что восстановление нормальной детонации за преградой произошло на меньшем расстоянии от преграды, чем расстояние удаления от преграды обходящих ее газов. И все же место расположения второго излома может служить критерием оценки эффекта возмущения, так как оно определяет степень ослабления инициирующей ударной волны.



Рис. 3. Фоторазвертка процесса детонации заряда со стальной преградой толщиной 2,0 мм.

Анализ результатов обработки экспериментальных данных и кинопанорам детонации зарядов с диафрагмами из металлов

различной плотности и прочности позволяет установить следующие закономерности.

1. Неметаллические преграды исследованных толщин, а также алюминиевые преграды толщиной 0,1 мм вызывают настолько слабые возмущения, что их невозможно однозначно классифицировать. Разброс параметров детонации, вызываемый случайным распределением плотности ВВ по длине заряда, в этом случае вполне соизмерим с эффектом возмущения на таких преградах.

2. При прочих равных условиях прослеживается тенденция к уменьшению скорости передачи детонации через преграду с повышением прочности и акустического сопротивления ее материала, что может быть связано с увеличением инерционных сил преграды, а также с увеличением потерь в ударной волне при ее движении по преграде. При этом такие характеристики возмущения детонации, как длина участка с уменьшенной скоростью перемещения свечения и период времени между срывом и возобновлением свечения могут изменяться незначительно. Так, при детонации зарядов с алюминиевой и молибденовой преградами толщиной 0,8 мм эти характеристики составляли 2—3 мм и 1,3—4 мкс соответственно, но при этом скорость перемещения свечения в первом случае составила 2380, во втором — 1860 м/с.

3. Увеличение толщины преграды независимо от материала приводит к уменьшению скорости передачи детонации, а также к увеличению длины участка восстановления детонации за преградой и к увеличению периода времени, в течение которого это восстановление осуществляется.

4. Увеличение времени задержки детонации в районе преграды неразрывно связано с градиентом импульса бокового разлета газообразных продуктов детонации до и после преграды. Чем больше задержка детонации, тем выше этот градиент, тем большее расстояние пройдут газы от оси заряда перед тем, как за преградой боковой разлет только начнется.

В соответствии с основной задачей исследований — изучения влияния толщины и свойств материала инертной преграды на детонацию заряда с целью возможного регулирования динамического угла встречи — определены минимальные расстояния между преградами в зарядах, имеющих несколько диафрагм. Для этого использовались 3 стальные преграды толщиной 0,5 мм с расстоянием между ними 15; 8 и 5 мм. Опробованы были также заряды (диаметр 5 мм) с преградами различной толщины из стали — 0,5; 0,8; 1,5 мм в количестве 6 шт. в одном заряде с расстоянием между ними 5 и 8 мм при следующем чередовании толщин от точки инициирования: 0,5; 0,5; 0,8; 0,8; 1,5; 1,5 мм. Все заряды прордетонировали полностью на всю длину. Отсюда можно заключить, что минимальное расстояние между преградами в случае порошкообразного тэна соизмеримо с длиной участка с уменьшенной скоростью перемещения свечения на фоторазвертках.

Более точные численные характеристики параметров возмущения детонации зарядов с инертными преградами, видимо, можно определить с помощью фоторазверток на взрывчатых веществах, которые обеспечивают большую стабильность параметров детонации, чем порошкообразные. Однако в практике наиболее технологичны порошкообразные высокобрзантные взрывчатые вещества, поэтому и в настоящих экспериментах был использован порошкообразный тэн. Исследование динамики поведения самой металлической преграды в процессе передачи через нее детонации проводилось с помощью пятилучевой импульсной рентгеновской установки. Заряд порошкообразного тэна в этом случае имел диаметр 8 и длину 80 мм. Диафрагмы были изготовлены из меди толщиной 0,4; 0,8; 1,0; 2,0 мм, а также из стали и титанового сплава толщиной 1,2 мм.

Динамика перемещения металлических преград исследовалась путем импульсного рентгенографирования процесса детонации заряда. В результате были получены серии рентгенограмм, кадры которых сняты через интервалы в 2—5 мкс. Анализ полученных рентгенограмм показал, что в общем случае динамика перемещений преграды в зарядах может быть сведена к следующему:

1) при подходе детонационной волны к преграде последняя под действием давления газов, движущихся в направлении распространения детонации, стремится приобрести форму профиля фронта детонации. В момент движения ударной волны по материалу преграды, разгрузка ее происходит с торца преграды, поэтому материал начинает растекаться в радиальном направлении, а сама преграда перемещаться в направлении распространения детонации;

2) в исследованном диапазоне толщин и материалов преград смещение их по ходу детонации не превышает 1—3 мм. Следовательно, при перемещении преграды на это расстояние в ВВ за преградой успевает начаться новый процесс детонации и образующиеся при этом газы затормаживают движение преграды. Приблизительная оценка величины скорости перемещения преград составляет величину, превышающую 600 м/с, причем заметна тенденция снижения скорости с увеличением массы преграды;

3) дальнейшее развитие процесса приводит к выпрямлению плоскости преграды за счет давления газов с обратной стороны. Краевые участки преграды продолжают растекаться и при достижении определенной для каждого материала степени деформации начинают разрушаться. Разлет осколков преграды в начальные периоды времени происходит в направлении, перпендикулярном распространению детонации.

Анализ различных рентгенограмм показывает, что общая закономерность перемещений материалов преград не изменяется, однако, естественно, численные значения параметров движения и периоды времени их реализации изменяются. Так, например, отчетливо заметна тенденция снижения скорости растекания при переходе от пластичной меди (830 м/с при $\delta=0,6$ мм) к более прочному титановому сплаву (360 м/с при $\delta=1,2$ мм). У прочных материалов разрушение краевых участков наступает раньше и при меньшей деформации, что, несомненно, связано с их механическими свойствами. Изменяется также и характер разрушения преград в зависимости от прочности их материала. У пластичной меди растекание носит струйный, вязкий характер, у титанового сплава и стали он более похож на хрупкое разрушение и осколки имеют большую массу.

В связи с тем, что смещения металлической преграды в зарядах в направлении детонации малы, а взаимодействие падающей и отраженной от преграды ударных волн происходит в непосредственной близости от исходного места расположения преграды, с известными оговорками можно допустить, что характер распределения бокового импульса разлета продуктов детонации схож с распределением импульса в случае отражения детонационной волны от жесткой стенки. Для практических расчетов это тем более справедливо, что величины смещения преграды вдоль направления детонации и расстояния от преграды, где происходит взаимодействие падающей и отраженной от преграды ударных волн, очень близки по величине. Отсюда в расчетах силового импульса, действующего на боковую поверхность зарядов, расчлененных металлическими преградами, можно рассматривать каждую отдельную часть как самостоятельный заряд, ограниченный жесткой стенкой, что, естественно, упрощает оценку параметров бокового разлета продуктов детонации по длине заряда.

Аналитическое решение задачи по распределению импульса в случае размещения заряда в абсолютно жесткой трубе приведено в работе

[7]. Авторами показано, что удельный импульс в данном случае определяется взаимодействием детонационной волны и волн разрежения. В работе была предложена расчетная формула для удельного импульса, действующего на единицу боковой поверхности

$$i = \frac{i_0}{8} \left[1 + 6\alpha(1 - \alpha) + \frac{3}{2} \alpha \ln \frac{3 - 2\alpha}{\alpha} + 6\alpha(1 - \alpha)(2\alpha - 1) \ln \frac{3 - 2\alpha}{2(1 - \alpha)} \right], \quad (1)$$

где $\alpha = x/l$; $i_0 = \frac{32}{27} \frac{P_n \cdot l}{D} = \frac{8}{27} \rho_0 \cdot lD$; P_n — давление на фронте детонационной волны; i_0 — удельный импульс на торце заряда; l — длина заряда; D — скорость детонации ВВ; x — координата текущего сечения. Из анализа этого уравнения следует, что при $\alpha=0$ ($x=0$) $i=0,125 i_0$.

При отсутствии ограничения бокового разлета продуктов детонации конфигурация взаимодействия детонационной волны и волн разрежения на всем протяжении заряда остается неизменной, за исключением торцевых участков, где существует заметное влияние осевого разлета. Главная характеристика этой конфигурации взаимодействия — l_a — длина участка заряда за фронтом детонации, куда еще не проникли волны разрежения, которая является основным параметром активной массы заряда. Величина длины активной части цилиндрического заряда определяется из условия

$$r/v = l_a/D,$$

где r — радиус заряда; v — скорость разлета газов. Если цилиндрический заряд открыт со всех сторон, то его активная масса будет занимать объем конуса с радиусом основания r (радиус заряда) и высотой l_a .

Из теории активной части заряда известно, что предельное значение активной массы при заданном диаметре заряда достигается при длине заряда $l=9/2 \cdot r$, и дальнейшее ее увеличение не приводит к увеличению импульса, если отсутствует ограничение бокового разлета. Отсюда в интервале длины заряда $0 < x < l_a$ удельный импульс будет изменяться от $0,125 i_0$ до i_0 , при этом i_0 находится из выражения (1).

В интервале $l_a < x < l - l_a$, где l — длина всего заряда, удельный импульс будет постоянным по величине и равным i_0 . В интервале $l - l_a < x < l$ импульс снижается до значения $0,125 i_0$. Распределение удельного импульса, действующего на боковую поверхность заряда в случае свободного разлета продуктов детонации, приведено на рис. 4, а.

При разделении открытого заряда ВВ на самостоятельные участки металлическими преградами распределение удельного импульса изменится. Основные изменения возможны лишь в районе установки преграды на расстоянии, не превышающих l_a по обе стороны от преграды. В остальных сечениях заряда распре-

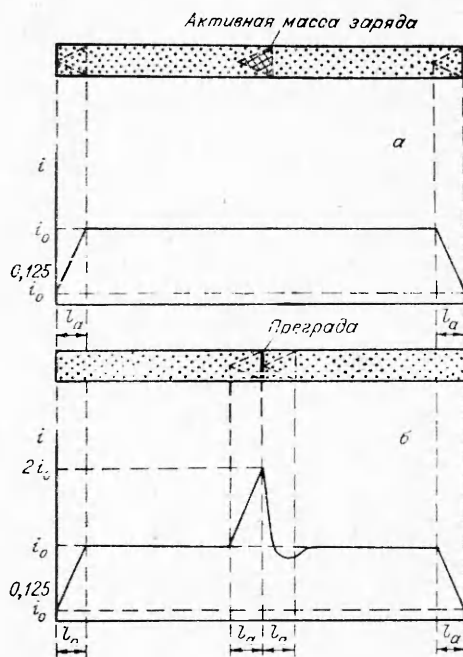


Рис. 4. Характер распределения импульса, действующего на боковую поверхность в цилиндрических зарядах при свободном разлете продуктов детонации.

деление импульса останется аналогичным рассмотренному выше.

При подходе детонационной волны к преграде, учитывая, что преграда исключает осевой разлет продуктов детонации, удельный импульс начнет увеличиваться. Часть энергии активной массы заряда в данном случае трансформируется в добавочную энергию бокового разлета. Поскольку массы активной и «пассивной» части на длине l_a от преграды равны между собой, в принципе возможно удвоение бокового импульса. Однако расход энергии активной части заряда на возбуждение ударной волны в преграде, на ее перемещение и растекание материала снизит величину импульса на преграде. В интервале x , где происходит увеличение удельного импульса перед преградой, он может быть подсчитан по формуле

$$i_1 = i_0 + \frac{x}{l_a} \cdot i_0 \cdot A,$$

где A — коэффициент, учитывающий потери энергии активной части заряда при передаче детонации через преграду.

При выходе из материала преграды ударной волны и возбуждении детонации на границе раздела металл — ВВ (сразу с нормальной скоростью) с учетом снижения влияния преграды на боковой разлет продуктов детонации по мере удаления фронта детонации от преграды удельный импульс будет снижаться до значений i_0 . В то же время, как было показано экспериментами, возбуждение детонации за преградой чаще всего происходит не на границе раздела, а на некотором удалении от нее, и самому процессу детонации предшествует стадия низкоскоростного химического разложения. Следует ожидать, что боковой импульс за преградой будет снижаться много больше, чем до значений i_0 (рис. 4, б).

Согласно распределению импульса по длине заряда, нагружаемый изнутри плакирующий элемент в виде трубы при использовании зарядов с металлическими преградами будет приобретать в различных сечениях различную скорость. Градиент скоростей полета элементов плакировки по длине заряда будет, в свою очередь, определять динамический угол встречи соединяемых металлических поверхностей. Следовательно, соответствующим подбором диаметра заряда, толщины и материала преград, а также расстояния между отдельными преградами, можно регулировать динамический угол соударения. При этом на процесс сварки благотворно влияет также значительное снижение средней по длине скорости детонации.

Заряды с металлическими преградами, как правило, не обеспечивают соединения соударяющихся поверхностей по всей площади, но достаточно частое чередование поясов прочной сварки с запрессовкой в целом ряде практических задач позволяет обеспечивать требуемую прочность и плотность закрепления труб в отверстиях.

*Поступила в редакцию
16/XII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика горения и взрыва. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1972, 8, 3.
3. И. В. Яковлев. ФГВ, 1972, 8, 4.
4. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
5. А. Н. Дремин, В. А. Веретенников, С. Н. Буравова. — В сб.: Детонация взрывчатых веществ и безопасность взрывных работ. М., «Недра», 1967.
6. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. — В сб.: Детонация взрывчатых веществ и безопасность взрывных работ. М., «Недра», 1967.
7. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.