

ХАРАКТЕР ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ПРИ СОЗДАНИИ В СРЕДЕ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ОГРАНИЧЕННОМ УЧАСТКЕ ПЛОСКОСТИ

А. Н. Ромашов, В. Ф. Евменов

(Москва)

Изучение механизма землетрясений привело к созданию определенных моделей очага. Общепринята такая точка зрения, согласно которой источником сейсмических волн является упругая энергия, накапливающаяся в очагах в результате деформации вещества вблизи некоторых плоскостей [1—3]. При разрушении вещества восстанавливается равновесное состояние, а накопленная до этого упругая энергия излучается в виде волн. Сам же процесс движения частей массива после разрушения в существующих моделях не считается источником возбуждения волн, хотя достаточно надежных количественных оценок этого процесса сделано не было. Вместе с тем справедливость такого пренебрежения не кажется очевидной. Действительно, предел накопления упругой энергии определяется прочностными свойствами среды. Для большинства горных пород предел прочности измеряется сотнями атмосфер. В процессе же перемещения вещества вдоль плоскости разрушения приходится преодолевать значительные силы трения, обусловленные наличием гидростатического давления, которое на глубинах порядка 10 км составляет 2,5÷3 тыс. атмосфер. С увеличением глубины это давление непрерывно растет, в то время как прочностные характеристики массива такой непрерывной корреляции с глубиной не имеют. Легко представить, что в процессе смещения относительно друг друга двух слоев вещества, сжатых давлением в несколько тысяч атмосфер, возможно образование в окружающем массиве интенсивных волн.

В настоящей работе изучается процесс возбуждения волн при создании в среде быстрого сдвига, который может реализоваться в очагах землетрясений при проскальзывании вещества вдоль плоскости разрушения.

Опыты проводились в лабораторных условиях. Схема опытов показана на рис. 1. Волны возбуждались в плоском блоке размером 810×560×100 мм, отлитом из пластилина. Для создания сдвиговой деформации использовалась пластина из гетинакса размером 150×100×20 мм, которую в разогретом виде прикладывали к торцу блока. После остывания пластина оказывалась прочно скрепленной с пластилином. Удар по торцу пластины, который возбуждал в блоке сдвиговую деформацию, производился с помощью свободно падающего металлического шара.

Из схемы опыта видно, что в блоке пластилина на ограниченном участке поверхности создается сдвиговая дефор-

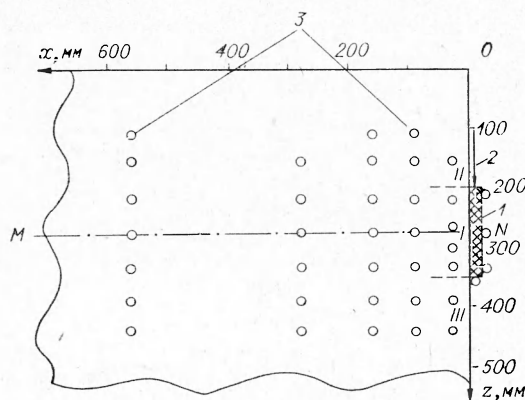


Рис. 1. Схема лабораторного эксперимента.
1 — пластина из гетинакса; 2 — направление удара по пластине; 3 — точки установки датчиков; I — область возбуждения сдвига; II и III — первоначально невозмущенные области.

мация, которая затем в виде волн распространяется по блоку. Параметры волн измерялись индукционными датчиками, регистрирующими массовую скорость среды, показания которых записывались на катодном осциллографе ОК-27М [4]. Датчики устанавливались в лунки на поверхности блока и заливались расплавленным пластилином, что обеспечивало надежный контакт датчиков с окружающей средой.

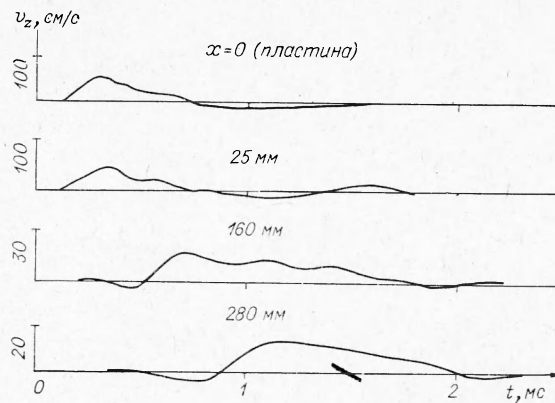


Рис. 2. Осциллограммы вертикальной составляющей скорости движения вещества в различных точках.

Первоначально регистрировались три компонента движения среды. Опыты показали, что движение происходит преимущественно в плоскости блока (z, x). Составляющая скорости (y), перпендикулярная плоскости блока, на порядок меньше. Поэтому анализировать волновую картину можно только по составляющим z и x .

Осциллограммы вертикальной составляющей скорости движения пластины и среды в точках блока, расположенных на различных расстояниях от плоскости сдвига по линии MN , проходящей через середину пластины, показаны на рис. 2. За положительное направление оси z взято направление удара (вниз), а оси x — направление распространения волны (влево от пластины). Поэтому на осциллограммах рис. 2 и последующих рисунков отклонение лучей вверх соответствует движению среды вниз (на z -составляющей) и от пластины влево (на x -составляющей).

Из рисунка видно, что движение среды в точках, примыкающих к пластине, по характеру совпадает с движением пластины. Годограф фазы, соответствующей максимуму скорости вниз, приведен на рис. 3. Этот максимум распространяется со скоростью 305 м/с. Скорость продольных волн, измеренных в блоке независимо, равна 600 ± 30 м/с. Соотношение скоростей показывает, что максимум скорости вниз связан с поперечной волной.

Осциллограммы скорости на рис. 2 показывают, что по мере удаления от первоначальной плоскости сдвига характер движения среды усложняется. Начиная с расстояния 160 мм вдоль линии MN направление первоначального смещения меняется на обратное. Движению в поперечной волне вниз предшествует смещение вверх. Годограф начала первого вступления показан на рис. 3. Он соответствует скорости 610 м/с. Эта величина совпадает со скоростью распространения продольной волны.

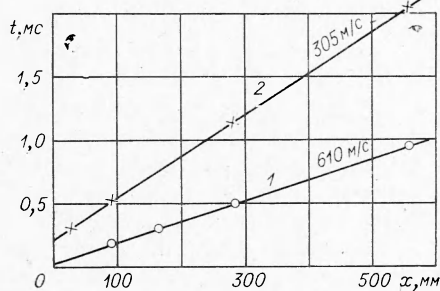


Рис. 3. Годографы продольной (1) и поперечной (2) волн.

Таким образом, при возбуждении сдвига вдоль некоторой ограниченной площадки в среде образуется не только поперечная, но и объемная волна, механизм возбуждения которой не очевиден. Можно предположить, что она возникает наряду с поперечной волной прямо на контакте пластина — пластилин за счет волн в самой пластине или

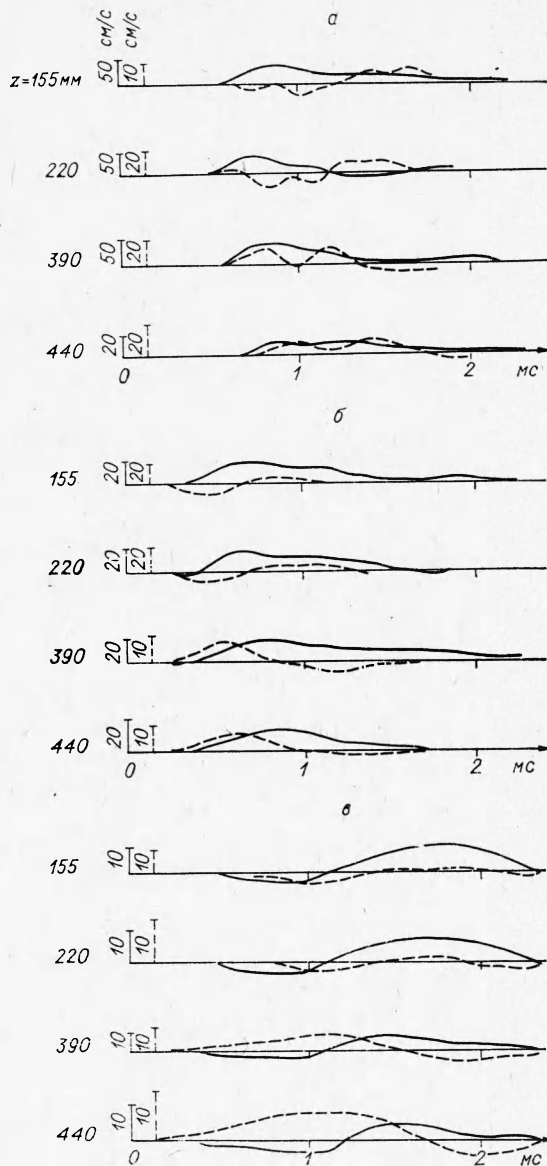


Рис. 4. Осциллограммы вертикальной (сплошная линия) и горизонтальной (штрих) составляющих в отдельных точках, расположенных вдоль вертикальных линий.

z — расстояние точки от верхнего края блока пластины;
 x — расстояние от боковой грани блока, вдоль которой производили сдвиг, равное: а) 25 мм, б) 160 мм, в) 560 мм.

дается в точках на расстоянии свыше 90 мм (рис. 4, б, в). В непосредственной близости от пластины (рис. 4, а) движение на x -составляющей более сложно. Наряду со сравнительно низкочастотным движением, которое на расстояниях свыше 90 мм является единственным, видна более высокочастотная составляющая. Эта же составляющая движения видна и на осциллограмме скорости самой пластины. Низкочастотное движение на пластине также заметно и имеет направление, совпадающее с аналогичным направлением движения частиц в блоке: в середине пластины низкочастотная составляющая практически не выделяется, верхний конец пластины имеет отрицательную x -составляющую

ее перекоса в процессе движения после удара. Вторым вероятным источником объемной волны является поперечная волна. Взаимодействие среды в области I (см. рис. 1), приведенной в движение при сдвиге пластины, с первоначально невозмущенной средой за ее пределами (области II и III) может быть источником возбуждения объемных волн. Чтобы выяснить действительный механизм, рассмотрим более подробно характер движения среды.

На рис. 4 показаны осциллограммы вертикальной и горизонтальной составляющих скорости движения среды в некоторых точках блока. Наиболее интересным является поведение x -составляющей скорости. В точках, расположенных вдоль линии MN (рис. 5), которая проходит через середину пластины, x -составляющая близка к нулю. Выше этой линии первое движение направлено к пластине; ниже линии — в обратном направлении. Скорость распространения вступления на x -составляющей совпадает со скоростью распространения первого вступления на z -составляющей и соответствует скорости продольной волны. Отсюда следует, что первое движение на x -составляющей выше линии MN обусловлено прохождением волны разрежения, а ниже линии — волны сжатия. Наиболее отчетливо такой характер волн наблюдается

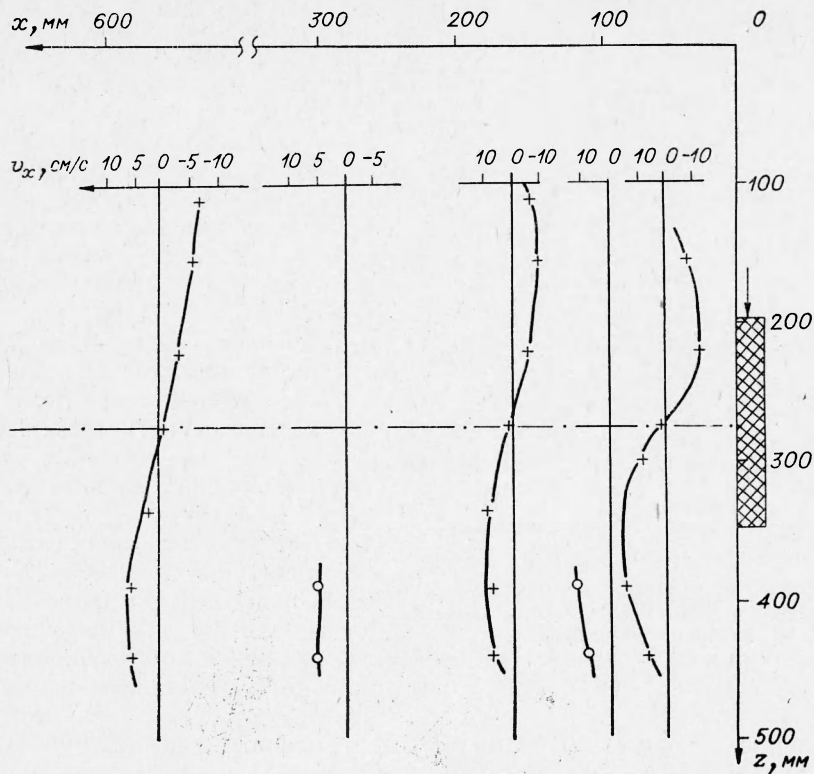


Рис. 5. Распределение по блоку горизонтальной составляющей скорости движения среды в объемных волнах.

щую низкочастотного движения, а нижний — положительную. Анализ движения среды в горизонтальном направлении показывает, что низкочастотная составляющая является основной. Высокочастотная компонента быстро затухает и ее практически можно не учитывать. Она обусловлена, очевидно, колебаниями в самой пластине и несет небольшой запас энергии.

В таблице приведены значения максимальных скоростей на z - и x -составляющих. Скорости измерялись в точках, расположенных примерно на уровне верхнего и нижнего краев пластины. Видно, что на пластине вертикальная составляющая превосходит горизонтальную примерно в 6 раз, в то время как в точках блока пластины это соотношение заметно меньше (2,5—3,4). Такая разница в соотношении показывает, что движение на x -составляющей в блоке не связано с горизонтальным движением пластины. Приведенные данные косвенно указы-

Координаты точки, мм	$z=220$ (вдоль верхнего края пластины) при x , равном						$z=390$ (вдоль нижнего края пластины) при x , равном					
	0	25	90	160	280	560	0	25	90	160	280	560
Максимальная скорость на x -составляющей, см/с	-13	-14	—	-6	—	-2	8	14	11	7	5	6
Максимальная скорость на z -составляющей, см/с	60	51	18	19	11	7	59	38	23	17	13	8
v_z/v_x	4,6	3,6	—	3,2	—	3,5	7,4	2,7	2,1	2,4	2,6	1,3

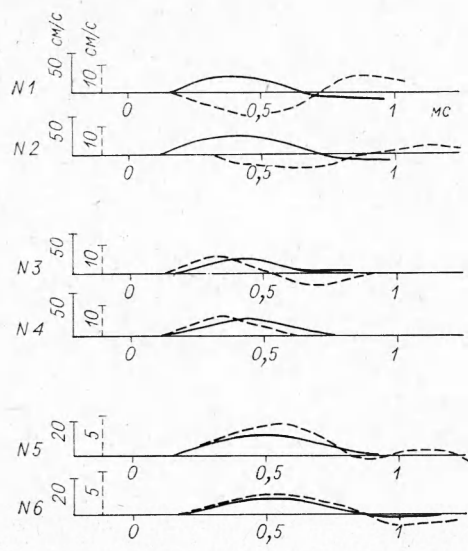


Рис. 6. Осциллограммы скорости движения вещества в симметричных точках, расположенных в двух блоках.
 z, x , мм: 1 — 10, 60; 2 — 10, 60; 3 — 280, —60; 4 — 280, 60; 5 — 410, —60; 6 — 410, 60.

вают на то, что образование продольных волн сжатия и разрежения в блоке пластина непосредственно не связано с движением пластины. Чтобы окончательно убедиться в этом, были поставлены специальные опыты. Пластина в этих опытах одновременно возбуждала волны в двух блоках, между которыми она располагалась. Идея опыта состоит в следующем. Если движение на x -составляющей в точках блоков обусловлено горизонтальной составляющей движения пластины, то тогда в симметричных точках, расположенных в разных блоках, первое смещение будет иметь разные знаки. Если же все движение среды обусловлено сдвиговой деформацией блоков на контакте с пластиной, то тогда движение в обоих блоках должно быть одинаково направленным по отношению к пластине.

На рис. 6 приведены осциллограммы скорости в симметричных точках. Отклонение лучей вверх соответствует движению вниз на z -составляющей, и в направлении от пластины в обоих блоках на x -составляющей. Характер осциллограмм в симметричных точках практически одинаков.

Таким образом, можно считать установленным, что при создании сдвиговой деформации вдоль некоторого ограниченного участка плоскости в среде возбуждается не только поперечная волна, но и две объемные волны. Граница между областями их распространения проходит по плоскости MN (см. рис. 1), которая перпендикулярна плоскости сдвига и проходит через середину участка, на котором создается сдвиговая деформация. Изучение объемных волн происходит, очевидно, в процессе своеобразного распада первоначального фронта поперечной волны. Первоначально сдвиговая деформация охватывает вертикальный слой среды в области I , который непосредственно соприкасается с пластиной. В силу связности среды движение от этого слоя передается не только к соседнему слою за счет сдвига, но и в области II и III . На границе областей I, II расстояние между соседними частицами при сдвиге увеличивается, в результате чего в области II возникнет волна разрежения. Вблизи границы областей I, III , наоборот, расстояние между частицами уменьшится, и в области III образуется волна сжатия. Наряду с указанными объемными волнами в области II и III передаются также и сдвиговые деформации.

На рис. 7 приведены распределения максимальных амплитуд вертикальной составляющей скорости в поперечной волне (направленной вниз) на различных расстояниях от пластины. Первоначально четкая граница между областями $I-II$ и $I-III$ постепенно размывается. Это значит, что граница, на которой происходит возбуждение объемных волн, для области II смещается вверх от горизонтальной плоскости, а для области III — вниз. Схематично это показано на рис. 8. В заштрихованной области вертикальная составляющая первого движения в объемных волнах направлена вверх, т. е. она противоположна направлению смещения в поперечной волне, в то время как выше и ниже

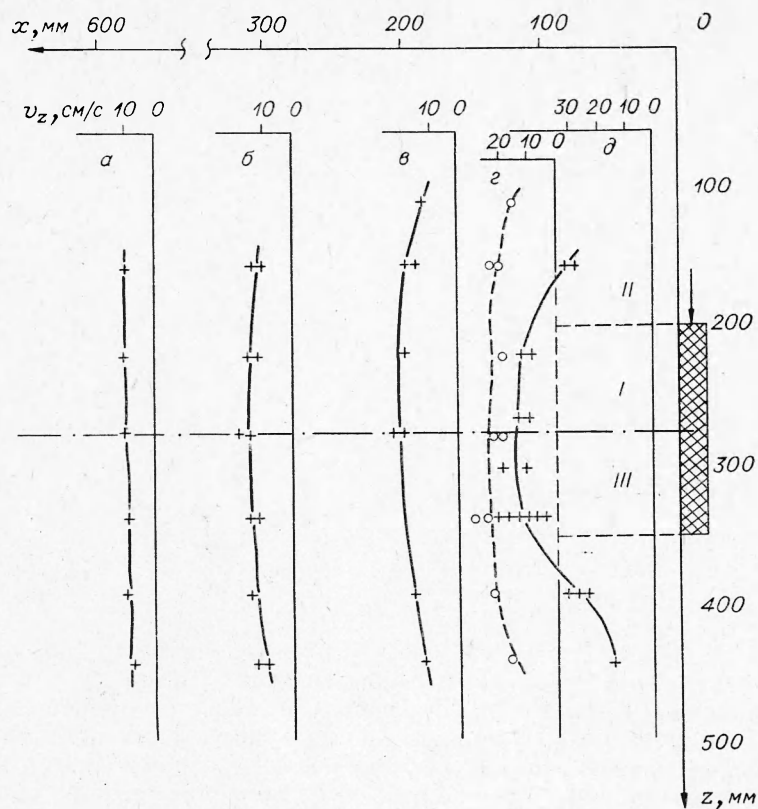


Рис. 7. Распределение по блоку максимальных значений вертикальной составляющей скорости в поперечной волне.
 x мм: а) 560, б) 280, в) 160, г) 90, д) 25.

этой области они совпадают. Это явление хорошо видно на осциллограммах (см. рис. 4, б, в) и на рис. 9. Очевидно, поперечная волна в процессе распространения в течение некоторого времени непрерывно излучает объемные волны, в результате чего ее фронт из плоского становится расходящимся. Поскольку амплитуда поперечной волны и градиенты скоростей вблизи границы области ее распространения уменьшаются с расстоянием, то интенсивность излучаемых объемных волн также должна убывать по мере распространения поперечной волны.

По-видимому, можно выделить некоторую эффективную зону вблизи первоначальной площадки сдвига, в пределах которой излучается основная часть энергии волн сжатия и разрежения. Эту зону и надо рассматривать как очаг излучения этих волн. По своим размерам она, по-видимому, существенно превосходит размеры первоначальной площадки сдвига. На это, в частности, указывает изменение длительности движения в объемных волнах, предшествующих вступлению поперечной волны. Из осциллограмм на рис. 2 и 4 видно, что эта длительность непрерывно увеличивается с расстоянием и достигает значений, превосходящих время развития первоначального сдвига.

Явление излучения объемных волн при распространении поперечных волн представляет интерес с точки зрения исследования механизма формирования длиннопериодных волн вблизи от очага возбуждения сдвиговой деформации. Оно помогает также понять и процесс формирования многофазного цуга колебаний. Так, например, при подземном взрыве в процессе куполообразного поднятия грунта вблизи свободной поверхности возбуждается поперечная волна. Первоначальное движе-

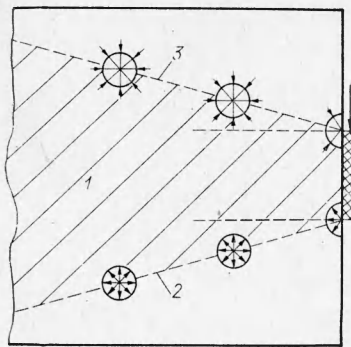


Рис. 8. Схема возбуждения объемных волн при распространении поперечной волны.

1 — область преимущественного распространения энергии поперечной волны; 2 — условная граница, на которой поперечная волна возбуждает волну сжатия; 3 — условная граница, на которой поперечная волна возбуждает волну разрежения.

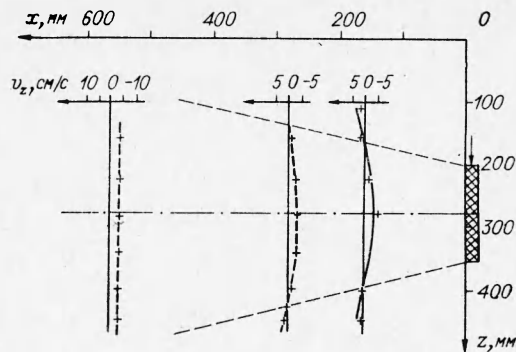


Рис. 9. Распределение по блоку амплитуды первого вступления вертикальной составляющей скорости, соответствующего объемным волнам.

вдоль поверхности перед максимумом скорости вверх появляется движение вниз. Происходит своеобразное формирование новых фаз движения, которые распространяются быстрее максимума скорости в поперечной волне. Первоначально простой импульс постепенно превращается в многофазное колебание, причем новые фазы появляются не только перед основной фазой движения в поперечной волне, но и после нее. Наблюдаемое изменение характера движения можно объяснить явлением излучения объемных волн в процессе распространения поперечной волны, первоначально возбужденной в некотором поверхностном слое грунта.

Аналогичные явления при землетрясениях должны быть, очевидно, выражены более резко в силу характера самого очага.

Таким образом, при возбуждении сдвиговой деформации вдоль ограниченной площадки на границе полупространства в нем возбуждается не только поперечная волна, но и объемные волны сжатия и разрежения. Области распространения этих волн разделены плоскостью, перпендикулярной границе полупространства и проходящей через середину площадки возбуждения первоначального сдвига. Нетрудно предположить, что при аналогичном сдвиге внутри безграничной среды все пространство вокруг очага разделится на четыре части, каждая из которых будет характеризоваться определенным знаком вступления продольных волн. Это значит, что вокруг такого очага будет квадрантное распределение знаков первых вступлений объемных волн, которое имеет место и в случае, когда движение в очаге вдоль плоскости сдвига происходит под действием релаксирующих упругих напряжений [2]. Разница будет только в том, что знаки волн в квадрантах будут противоположными. Полученный результат может существенно изменить представления о механизме очагов и источников энергии землетрясений.

Поступила в редакцию
17/IV 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ф. Саваренский, Д. П. Кирнос. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Гостехиздат, 1955.
2. Л. М. Балакина и др. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М., «Наука», 1972.

3. А. В. Введенская. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., «Наука», 1969.
4. А. И. Соколик, А. И. Станиславский, А. С. Зверев. Шестиканальный электронный осциллограф ОК-27М. ЦИТЭИН, тема № 35, № II—59—117/9, 1959.
5. А. Н. Ромашов. В сб. «Взрывное дело», № 64/21. М., «Недра», 1968.

УДК 532.593+539.26+539.51

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ БРОНЗ, СОДЕРЖАЩИХ СВИНЕЦ, СО СТАЛЬЮ

Ю. А. Конон, Т. М. Соболенко

(Новосибирск)

В работе [1] показано, что все медные сплавы, кроме содержащих свинец, имеют достаточно широкий диапазон параметров сварки взрывом с конструкционными сталями. В работе [2], где опубликован наиболее полный перечень металлов и сплавов, свариваемых с помощью взрыва, отсутствуют данные по свариваемости пары: оловянно-цинково-свинцовистая бронза — сталь. Первые попытки получить удовлетворительное соединение пары сталь+бр. ОЦС4-4-2,5 по обычным режимам и схемам, применяемым для большинства пар металлов и сплавов, не дали положительных результатов. При этом на поверхности стали с хорошо развитыми волнами наблюдался слой бронзы. Это указывает на образование соединения в процессе сварки, которое впоследствии было разрушено. По-видимому, одной из причин разрушения только что образовавшегося, но окончательно не сформировавшегося соединения являются силы, возникшие при разгрузке образца.

Для уменьшения влияния этих сил целесообразно увеличить время действия давления продуктов детонации в процессе сварки. Известно, что время действия давления, зависит главным образом от высоты заряда ВВ, определяемой безразмерным параметром r [3]. Проведенные опыты с изменением r при оптимальных других технологических параметрах сварки показали, что с его увеличением прочность соединения растет, однако во всем изученном диапазоне равнопрочного соединения получить не удалось (рис. 1). Термическая обработка дала увеличение прочности соединения в 3—1,5 раза, однако, и в этом случае равнопрочного соединения не было получено.

Для выяснения причин этого явления была проведена сварка взрывом стали с бронзой ОЦ4-3, химический состав которой аналогичен изучаемой бронзе, но без включений свинца. В первых же опытах было получено равнопрочное соединение, в то время как даже незначительное наличие свинца (около 1%), в бронзе ОЦС4-4-1, отрицательно влияло на ее свариваемость со сталью. Были сварены взрывом образцы оловянно-цинково-свинцовистой бронзы друг с другом, а также с медью. Во всех случаях непосредственно после сварки взрывом прочности соединения слоев на отрыв более 10 кг/мм² получить не удалось (см. табл. 1).

Попытки получить непосредственное соединение свинца со сталью сваркой взры-

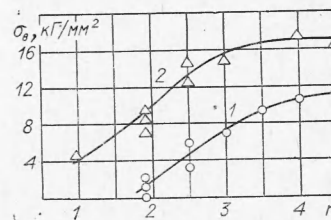


Рис. 1. Зависимость прочности соединения на отрыв пары сталь+Бр. ОЦС-4-4-2,5 от r после сварки взрывом (1) и термообработки 620°С (3 часа) (2).