

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-5-11

С. В. Хаустов, канд. техн. наук, В. В. Пай, д-р физ.-мат. наук, С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН,
В. И. Лысак, академик РАН, А. Д. Кочкалов, аспирант*

ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ В СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, pai@hydro.nsc.ru*

Предложен фотоэлектрический метод определения скорости фронта ударной волны в воздухе в зазоре между соударяющимися пластинами при сварке взрывом. С использованием ловушек, размещаемых в сварочном зазоре, обнаружены дисперсные металлические частицы кумулятивного происхождения, заполняющие область ударно-сжатого воздуха в зазоре и существенно влияющие на скорость фронта ударной волны в воздухе.

Ключевые слова: сварка взрывом, ударно-сжатый газ, тепловой поток, термопарный метод

S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, A. D. Kochkalov*

STUDY OF CUMULATIVE AND SHOCK WAVE PROCESSES IN THE AIR IN THE WELDING GAP DURING EXPLOSION WELDING

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

**Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, pai@hydro.nsc.ru*

A photoelectric method is proposed for determining the velocity of the shock wave front in air in the gap between colliding plates during explosion welding. Using traps placed in the welding gap, dispersed metal particles of cumulative origin were discovered, filling the area of shock-compressed air in the gap and significantly affecting the speed of the shock wave front in the air.

Keywords: explosion welding, shock-compressed gas, cumulation, photoelectric method

При сварке взрывом в сварочном зазоре возникает область ударно сжатого газа (УСГ), нагретая до нескольких тысяч градусов, которая, по многочисленным экспериментальным данным, может вызывать предварительный подогрев свариваемых поверхностей [1–6]. При этом на параметры области УСГ (температура, скорость ударной волны) очень сильно влияют дисперсные кумулятивные частицы, которые вылетают из точки контакта при соударении пластин [2, 5, 6]. В работах [5, 6] с использованием малоинерционных термобатарей, размещаемых в зазоре, был определен тепловой эффект от ударно-сжатого газа и определены значения конвективного теплового потока, что позволило оценить температуру предварительного подогрева поверхностей перед соударением. Там же отмечалось механическое воздействие на термодатчики дисперсных металлических частиц кумулятив-

ного происхождения. Также было отмечено, что тепловой эффект от области УСГ слабо зависит от скорости точки контакта, а определенная скорость фронта ударной волны в воздухе оказалась больше, чем рассчитанная по ударной адиабате, что связывалось с наличием в воздушном зазоре между пластинами дисперсных металлических частиц.

В связи с этим целью данной работы явилось исследование процессов соударения металлических пластин при сварке взрывом и определение параметров дисперсных металлических частиц, образовавшихся из диспергированной кумулятивной струи, а также разработка фотоэлектрического метода определения скорости фронта ударной волны в воздухе.

При соударении металлических пластин в условиях сварки взрывом (малые углы соударения $\gamma < 20^\circ$, скорости точки контакта $V_k = 2,5 \dots 3$ км/с) кумулятивная струя пред-

ставляет собой облако металлических частиц, образованных из материала соударяемых пластин [4]. Для определения параметров частиц и их распределения по сечению

зазора между пластинами использовалась схема сварки взрывом показанная на рис. 1. Сваривались стальные пластины толщиной 4+10 мм по параллельной схеме, с зазором

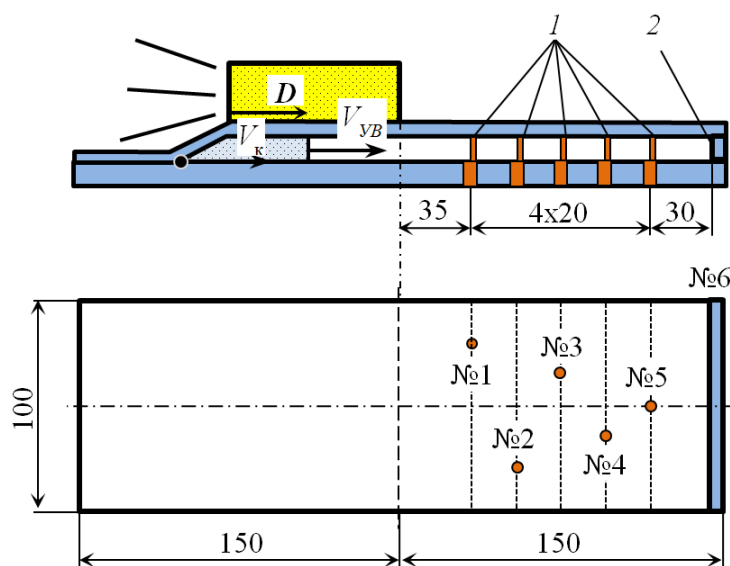


Рис. 1. Схема установки мишеней в зазоре ($h = 8$ мм) между стальными пластинами 4+10мм ($D = 2000$ м/с):

1 – медные мишени №1-5; 2 – стальная мишень №6

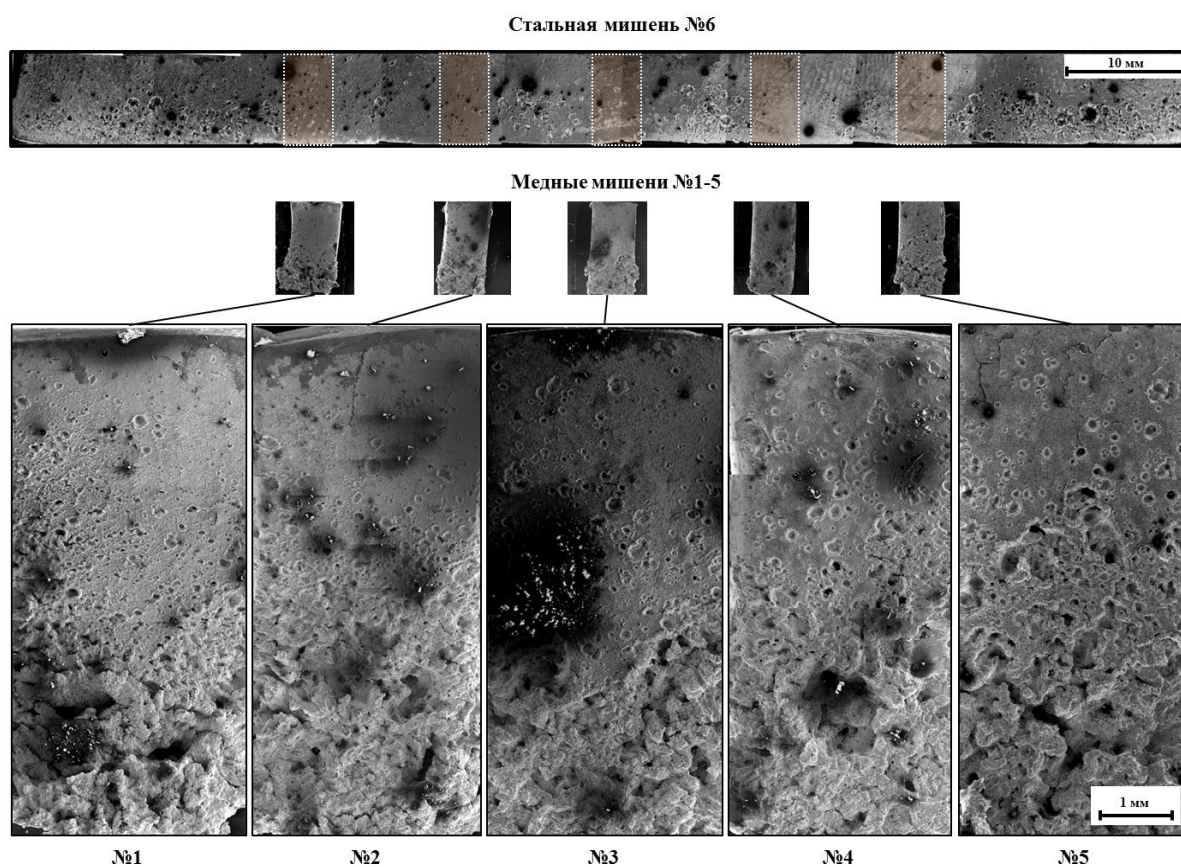


Рис. 2. Внешний вид стальной и медных мишеней после воздействия дисперсных металлических частиц, вылетающих из области точки контакта

равным 8 мм. Заряд взрывчатого вещества (ВВ) (смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком) размещался в начальной части пластины, как показано на рис. 1. Таким образом, процесс сварки искусственно обрывался. В зазоре между пластинами, в части, не накрытой зарядом ВВ, размещались 5 медных мишеней в виде полуцилиндров, обращённых плоской частью перпендикулярно направлению сварки. В конце неподвижной

пластины размещалась стальная мишень, полностью закрывающая сварочный зазор. Скорость детонации ВВ, определенная электроконтактным способом, оказалась равной 2000 ± 50 м/с.

На рис. 2 показаны стальная и медные мишени после воздействия на них кумулятивного потока. Видно, что при столкновении металлических частиц с мишенями на поверхности последних, преимущественно в

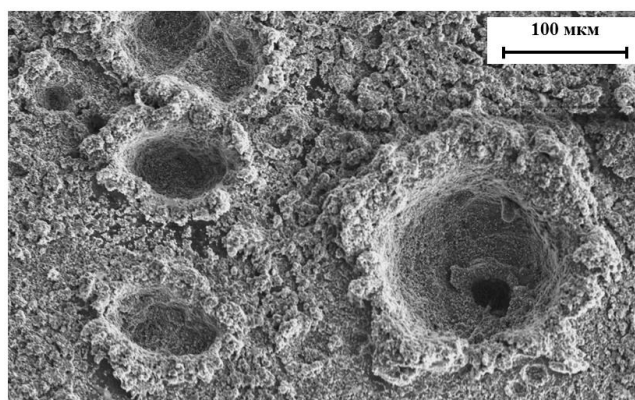


Рис. 3. Ударные кратеры на поверхности медной мишени

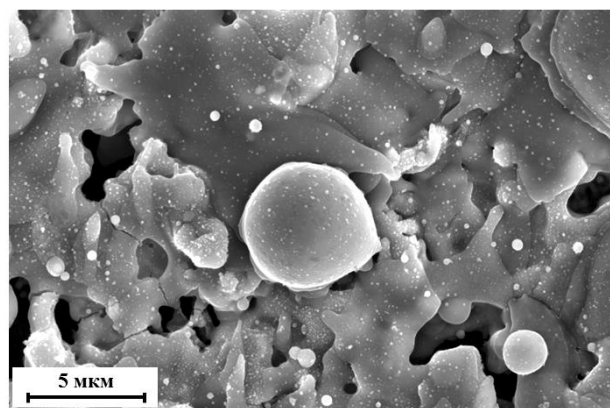
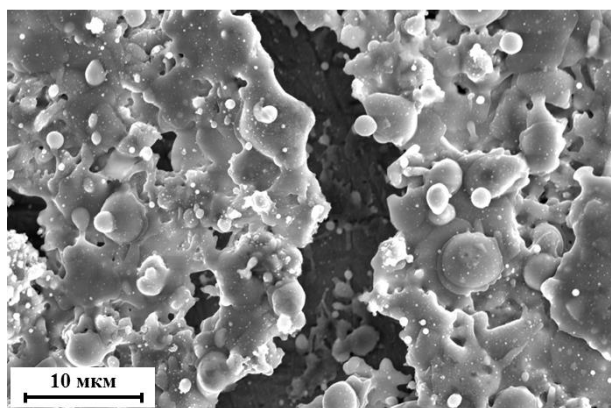
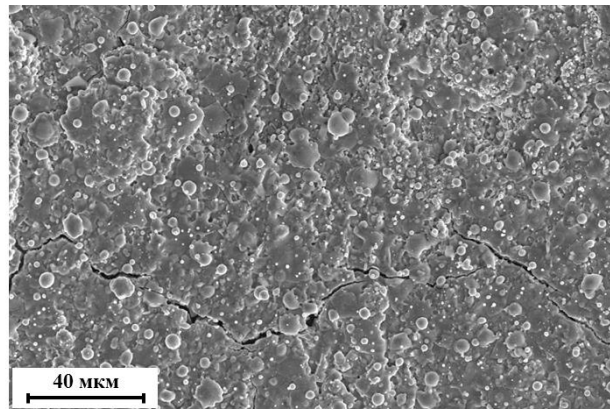
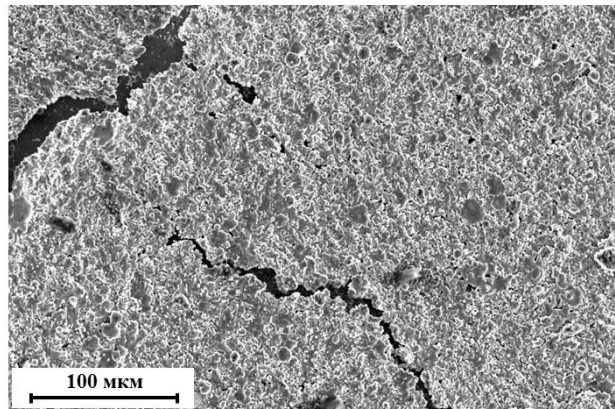


Рис. 4. Внешний вид и структура поверхности покрытия на медных мишенях

нижней части мишени, образовались ударные кратеры и сформировались покрытие. Пунктирными линиями показаны области на стальной мишени, которые оказались в «тени», образованной медными мишенями. Несмотря на то, что воздействие кумулятивных частиц оказалось минимальным и ударные кратеры практически отсутствуют, сплошное покрытие сформировалось и в этих областях.

На медных мишенях наблюдается похожая картина, следы механического воздей-

ствия кумулятивных частиц и ударные кратеры расположены, в основном в нижней части мишеней (рис. 3). При этом толщина сформированного покрытия практически не зависит от удаленности мишени от окончания соударения пластин и составляет от 4 до 15 мкм в верхней и средней областях мишеней. Также следует отметить, что поверхность покрытия состоит из частиц, в основном, микронного и субмикронного размера, очевидно испытывающих наибольшее торможение в спутном потоке ударно-сжатого

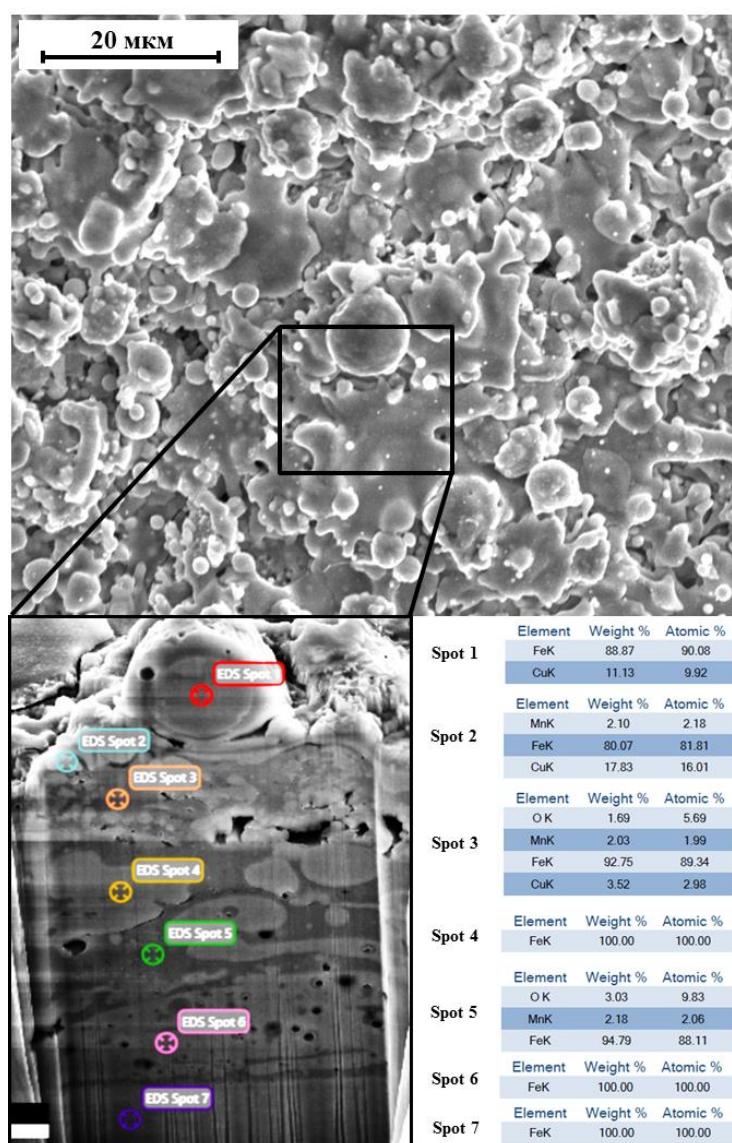


Рис. 5. Внешний вид поверхности покрытия на стальной мишени №6, место вырезки и общий вид поперечного сечения покрытия и химический состав участков сечения

воздуха.

Анализ структуры и химический анализ покрытия показывает (см. рис. 4), что оно сформировано из преимущественно (до 80%) железных частиц микронного и субмикронного размера, причем в верхней части мишеней, где толщина покрытия минимальна (2 ... 4 мкм), присутствуют трещины, а покрытие отстает от поверхности мишени, что связано с разностью температур покрытия и поверхности мишени, обусловленной интенсивным теплоотводом в массивную и относительно «холодную» медную мишень. Небольшое содержание меди (до 20%) в по-

крытии обусловлено выбросом из ударных кратеров продуктов разрушения медной мишени и оседанием их на поверхности.

Наличие кислорода и небольшого количества пор можно объяснить насыщением кислородом поверхностных слоев субмикронных железных частиц в процессе их движения в ударно-сжатом воздухе, нагретом до нескольких тысяч градусов.

На рис. 5 показан внешний вид поверхности стальной мишени и поперечное сечение сформированного на нем покрытия. Видно, что оно представляет собой слоистую структуру из чередующихся светлых (деформиро-

**Параметры ВВ и кинематические параметры соударения стальных пластин
(2 мм + 2 мм) зазор 8 мм**

Тип ВВ	Содержание ВВ	Высота заряда, мм	Измеренная скорость детонации D , м/с	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения γ , град	W_2 , МДж/м ²
(6ЖВ + кв. песок)	67/33 % об.	20	2580±50 (1,2 базы) 2560±50 (3 база)	550	12,3	0,89

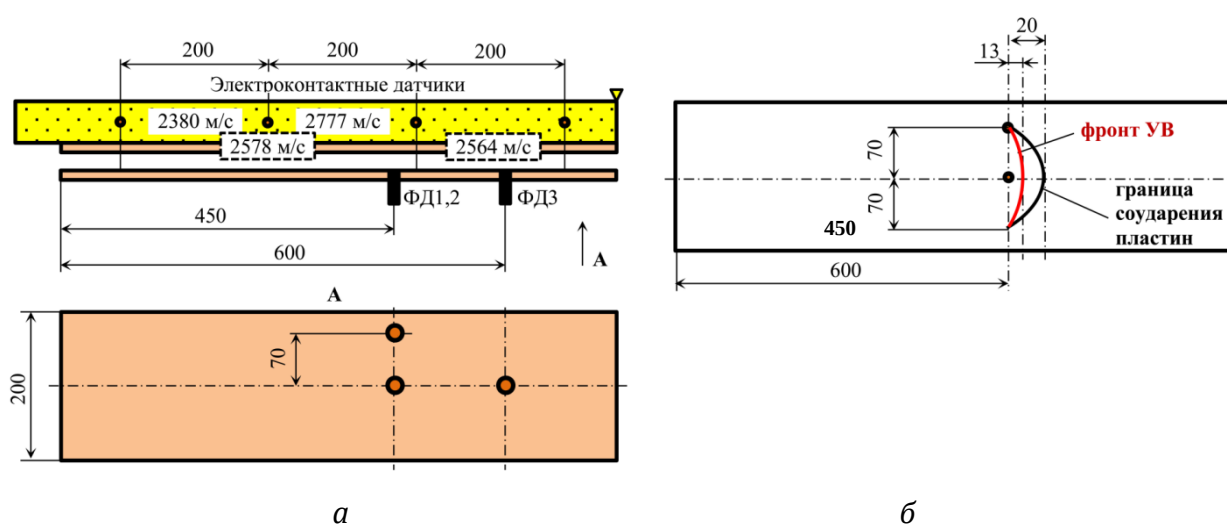


Рис. 6. Схема измерения скорости фронта ударной волны в воздухе в зазоре между пластинами и схема расположения фотодатчиков (ФД 1,2 и 3) в неподвижной пластине (а) и профили фронта ударной волны в воздухе с границами соударения пластин (б)

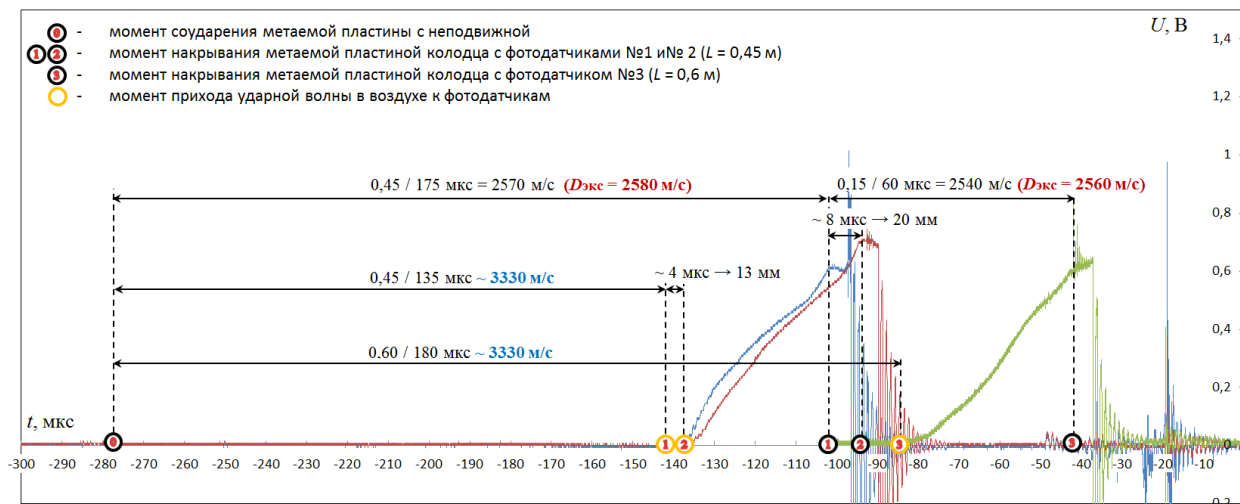


Рис. 7. Осциллограмма фото-ЭДС с датчиков ФД1, 2 и 3

ванных при ударе крупных железных частиц) и темных (образованные из более мелких, насыщенных кислородом, субмикронных железных частиц) областей.

Для определения скорости фронта УВ в воздухе $V_{УВ}$ использовали фотоэлектрические датчики (фотодиоды), размещенные в колодце, вырезанном в неподвижной пластине (рис. 6) на расстояниях 0,45 и 0,6 м. Для определения профиля фронта ударной волны на расстоянии 0,45 м от начала пластины размещались два фотодатчика ФД1 и ФД2 (в центральной и краевой части пластины).

Сваривали стальные пластины из низкоуглеродистой стали толщиной 2+2 мм. Зазор между пластинами составлял 8 мм. В таблице указаны параметры ВВ и параметры соударения. Контроль скорости детонации осуществлялся электроконтактным способом на трех базах. Расчетная скорость фронта УВ [7], при скорости поршня равной $V_k=2580$ м/с составила 3100 м/с, или $\sim 1,2 V_k$.

На рис. 7 показаны осциллограммы фото-ЭДС с датчиков ФД1, 2 и 3 синхронизированные во времени. Разница между моментами времени, соответствующими началу соударения пластин и нарастанию фото-ЭДС, характеризующей интенсивность излучения фронта ударной волны и области

ударно-сжатого воздуха, позволяет найти скорость фронта ударной волны в воздухе, равной $V_{УВ} \sim 3330$ м/с, или $\sim 1,3 V_k$. Также по разнице между моментами времени 1 и 2, соответствующими приходу ударной волны к фотодатчикам ФД1 и ФД2 и накрыванию их метаемой пластиной можно построить профиль фронта ударной волны в воздухе и границу соударения пластин в сечении, находящемся на расстоянии 0,45 м от начала сварки (см. рис. 6, б).

Выводы

1. Разработан фотоэлектрический метод определения скорости фронта ударной волны в воздухе в сварочном зазоре при соударении пластин в условиях сварки взрывом. Экспериментально определена скорость фронта ударной волны в воздушном зазоре между пластинами на расстояниях 0,45...0,6 м составляющая $\sim 1,3 V_k$.

2. С использованием мишеней-ловушек, размещаемых в сварочном зазоре при сварке взрывом обнаружены дисперсные металлические частицы кумулятивного происхождения субмикронного и микронного размера, влияющие на параметры ударно-сжатого газа в зазоре.

Библиографический список

1. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас – 2-е изд. доп. перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
2. Ишуткин, С. Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, В. А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1980. – №6. – С. 69-73.
3. Ишуткин, С. Н. Численное исследование воздействия газового потока на поверхность сталкивающихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, Н. И. Пак // Физика горения и взрыва. – 1981. – №1. – С. 151-153.
4. Годунов, С. К. О влиянии вязкости материала на процесс образования струй при соударениях металлических пластин / С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. И. Мали // Физика горения и взрыва. – 1975. – №1. – С. 3-18.
5. Investigation of Thermal Processes in the Gap during Explosion Welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 209 (2023). – 124166.
6. Методика определения теплового потока от ударно сжатого газа перед точкой контакта к поверхности пластин при сварке взрывом / С. В. Хаустов, В. В. Пай, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Д. Кочкалов // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2022. – № 11 (270). – С. 11-16.
7. Физика взрыва и удара : учеб. пособие для вузов / Орленко Л. П. – 3-е изд., перераб. – М. : Физматлит, 2019. – 399 с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00942,
<https://rscf.ru/project/23-29-00942/>