

21. J. P. Charlesworth, I. Macphail, P. E. Madsen. *J. Mater. Sci.*, 1970, 5, 7, 580—603.
22. Л. Д. Ж. Виленд. В сб. «Сверхпроводящее соединение ниобий — олово». М., «Металлургия», 1970, 45.
23. Б. Робертс. В сб. «Новые материалы и методы исследования металлов и сплавов». М., «Металлургия», 1966, 9.
24. Н. Novotny. *J. Phys. Chem.*, 1956, 60, 677—678.
25. J. H. Carpenter, A. W. Searsey. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1956, 78, 10, 2079.

УДК 662.215.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ Э. Д. С. НЕКОТОРЫХ ПАР МЕТАЛЛОВ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

*С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. В. Полюдов  
(Новосибирск)*

Описаны результаты опытов по измерению э. д. с., возникающей при ударном сжатии пар металлов медь — никель, медь — молибден, дуралюмин — никель в интервале давлений 0,1—1,0 Мбар.

Впервые такие опыты были поставлены в [1] с целью измерения температуры за фронтом ударной волны (ФУВ) и повторены в [2]. В этих работах предполагалось, что величина э. д. с. ударно-сжатого контакта объясняется только термоэлектрическим эффектом. Для коэффициента термо-э. д. с. учитывались поправки на давление, полученные в статических условиях. Однако измеренная в [1, 2] амплитуда сигнала в 3—4 раза превышала величину термо-э. д. с., соответствующую температуре за фронтом УВ из термодинамического расчета. Наиболее полные к настоящему времени исследования данного вопроса проведены в [3]. В этой работе подтверждено, что величина э. д. с. не может быть объяснена только термоэлектрическим эффектом, кроме того, отмечались следующие свойства явления: 1) контактный переход является генератором э. д. с. (амплитуда сигнала не зависит от внешнего нагрузочного сопротивления и площади контакта); 2) полярность сигнала имеет знак коэффициента термо-э. д. с. пары, по крайней мере для веществ без фазовых переходов; 3) э. д. с. пары медь — константан линейно зависит от давления. В [4] обсуждены возможные источники э. д. с. при ударном сжатии, которые можно разделить на статические (внутренняя контактная разность потенциалов) и динамические, обусловленные перераспределением зарядов во фронте УВ. С последними связывается э. д. с. исследованных в работе лантаноидов.

Отмеченная линейная зависимость э. д. с. от давления и возможность создания основанного на этом эффекте датчика давления в металлах [3] вызывают к изучаемому явлению определенный практический интерес. С точки зрения использования такого датчика необходима проверка зависимости величины э. д. с. от давления для широкого набора пар, а также выяснение влияния на наблюдаемый сигнал геометрии опыта, косоугольного падения УВ, кривизны ее фронта и влияния изолятора (см. ниже). В настоящей работе описаны эксперименты по проверке этих вопросов.

**Калибровка пар медь — никель, медь — молибден, дуралюмин — никель.** Выбор первых двух пар обуславливался тем, что они имеют разный знак коэффициента термо-э. д. с., а для выяснения возможности из-

мерения давления таким датчиком в сплавах калибровалась пара дуралюмин — никель.

В работе использовались следующие материалы: никель с добавкой 2,5% Мп, молибден марки ВЧ, медь марки М1 и дуралюмин Д16.

Схема эксперимента изображена на рис. 1. Один из металлов пары являлся экраном 1, подводящим плоскую УВ, которая создается в экране ударником, метаемым зарядом ВВ, или посредством прямого контакта металла с ВВ. В момент прохождения ударной волной контактного перехода между экраном и цилиндрическим образцом 2, изготовленным из второго металла пары, возникает э. д. с. и на внешнем нагрузочном сопротивлении ( $R=100 \text{ ом}$ ) регистрируется сигнал, амплитуда которого мало меняется за время движения УВ по образцу. В момент прохождения ударной волной контактного перехода с электродом 3, изготовленным из того же материала, что и экран, возникает обратно включенная в цепь э. д. с. и амплитуда сигнала падает до нуля. Описанный механизм зависимости сигнала от времени основан на рассмотрении только внутренней контактной разности потенциалов и иллюстрируется экспериментальной осциллограммой (рис. 2).

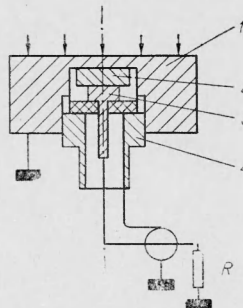


Рис. 1.

Электрический контакт обеспечивался сжатием сборки винтом 4 (см. рис. 1). Коаксиальная конструкция экранировала датчик от электромагнитных наводок при взрыве. Малые толщины образцов позволяли пренебречь влиянием боковой и догоняющей разгрузки во время движения ударной волны по образцу. Размеры образцов: диаметр 6 мм, высота 3 мм, диаметр электрода 3 мм. Кроме того, проверялся датчик с площадью контакта 0,6 мм<sup>2</sup>, составленный из пары дуралюмин — никель. В этом случае конструкция изменялась: никелевая проволока диаметром 0,9 мм клеивалась в керамическую

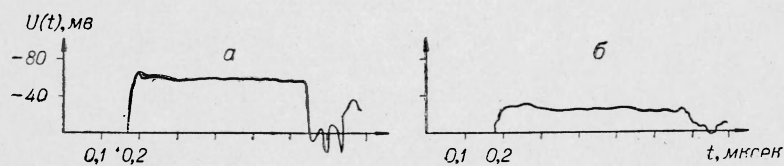


Рис. 2.

трубку 0,9×2 мм, которая запрессовывалась в экран. Чтобы избежать разрушения контактного перехода на время, достаточное для регистрации сигнала прибором подбирались керамика с близким к материалу экрана акустическим импедансом.

Сигнал регистрировался осциллографом С1-11, для увеличения чувствительности которого применялся дополнительный усилитель на транзисторах. Измерительный тракт позволял разрешать сигналы с длительностью фронтов  $\approx 2,5 \text{ нсек}$  при максимальной чувствительности 10 мВ/см на экране осциллографа.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы, полученные при калибровке пары медь — никель. Длительность переднего и заднего

фронта на осциллограмме (а)  $\sim 25$  и  $\sim 10$  нсек соответственно. При общей длительности сигнала  $\sim 0,5$  мксек время  $T$  прохождения УВ по образцу определялось с точностью 3%. Экспериментально определенная скорость УВ:

$$D = L/T,$$

где  $L$  — толщина образца. По измеренной таким методом скорости УВ и динамическим адиабатам никеля и молибдена [5, 6] рассчитывалось давление в образце и экране. Ошибка в определении давления при обсчете осциллограммы (см. рис. 2, а) составляла  $\sim 5\%$ .

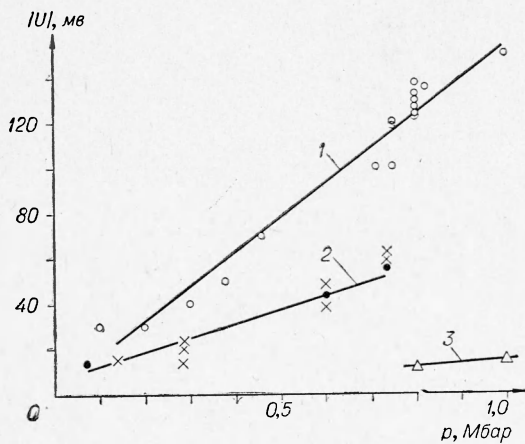


Рис. 3.

При обсчете осциллограммы (см. рис. 2, б) ошибка в измерении давления  $\sim 10\%$  ввиду большей кривизны ФУВ в этом опыте. Результаты калибровочных экспериментов представлены на рис. 3. Графики пар медь — никель 1, дуралюмин — никель 2 и медь — молибден 3 получены при статистической обработке экспериментальных точек в предположении, что зависимость э. д. с. от давления линейная:  $U = ap + b$ . Статистический вес каждой точки определялся как погрешностью в определении давления, так и погрешностью в измерении амплитуды по

полке сигнала. Найденные значения коэффициентов  $a$  и  $b$  приведены в таблице. На рис. 3 по оси ординат отложено давление в экране, а по оси абсцисс абсолютная величина э. д. с. Знак э. д. с. для пар медь — никель, дуралюмин — никель отрицательный, а для пары медь — молибден положительный, что соответствует знаку их коэффициента термо-э. д. с. Кривая 2 построена по результатам опытов на датчиках с площадью контакта  $28 \text{ мм}^2$  (черные кружки) и с площадью  $0,6 \text{ мм}^2$  с керамической изоляцией (крестики). Следует отметить, что площади контактов в этих случаях различаются в 46 раз. Величины э. д. с. для этих датчиков совпадают в пределах экспериментальной ошибки, это подтверждает вывод [3], что контактный переход является генератором э. д. с. В большей степени э. д. с. зависит от чистоты материалов экрана и образца: так амплитуда сигнала для пары медь — никель марки НПА-1 при  $p = 0,8 \text{ Мбар}$  равна  $\sim 80 \text{ мв}$ , вместо  $\sim 120 \text{ мв}$  для пары медь — никель с 2,5% Мп. Однако это не создает принципиальных трудностей для применения таких датчиков в исследованном диапазоне давлений.

Пара	$a, \text{ мв/Мбар}$	$b, \text{ мв}$
Медь — никель	$153 \pm 8$	$0 \pm 20$
Дуралюмин — никель	$60 \pm 5$	$7 \pm 2$

**Косое падение УВ на контактную поверхность.** Выяснение зависимости амплитуды и длительности переднего фронта сигнала от угла падения ударной волны на переход является существенным для измерения давления датчиком в тех случаях, когда ФУВ сильно искривлен. Кроме того, такие опыты позволяют, как будет показано ниже, ча-

стично разделить роль статических и динамических источников э. д. с. при ударном сжатии металлов.

Опыты проводились с парой медь — никель. Геометрия опыта изображена на рис. 4, а. Угол  $\alpha$  между плоскостью ФУВ и плоскостью контактной поверхности менялся от 0 до 60°. Давления создавались ударником достаточной толщины для того, чтобы поддерживать постоянную амплитуду ФУВ на время полного закрытия им контактного перехода. Однако при больших углах падения разрушение контакта боковой разгрузкой может сильно влиять на исследуемый сигнал, поэтому для уменьшения разгрузки между внутренней поверхностью экрана и образцом запрессовывался изолятор.

Анализ осциллограмм, полученных при косом падении, показал, что длительность переднего фронта сигнала соответствует времени закрытия контактной поверхности ударной волной. Амплитуда сигнала достигает максимальной величины  $U_+$  в момент полного закрытия УВ контактного перехода. График зависимости  $U_+$  от угла  $\alpha$  представлен на рис. 5. Увеличение  $U_+$  при  $\alpha=60^\circ$  вызвано, по-видимому, влиянием изолятора.

Оценим, на сколько изменится амплитуда регистрируемого сигнала за счет поляризации диэлектрика. Поведение ударно сжатых диэлектриков характеризуется величиной поляризации  $P_0$  на ФУВ. Согласно [7] для начального тока в цепи замкнутых конденсатора можно записать

$$I_0 = P_0 S (T_1 \kappa)^{-1},$$

где  $T_1$  — время прохождения УВ по диэлектрику;  $S$  — площадь пластин; параметр  $\kappa = \varepsilon_2 \sigma / \varepsilon_1$  ( $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — диэлектрические проницаемости вещества соответственно до и после ФУВ,  $\sigma$  — сжатие вещества за ФУВ). Как видно из опыта (рис. 4, а), при больших углах  $\alpha$  ФУВ выходит на свободную поверхность изолятора и реализуется схема,

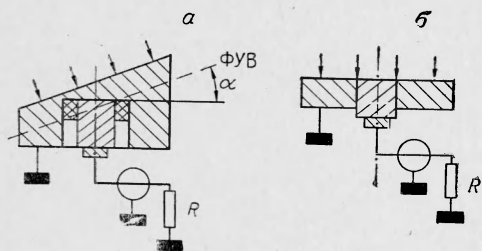


Рис. 4.

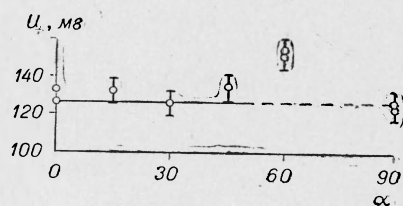


Рис. 5.

рассмотренная в [7]: поверхности экрана и образца являются обкладками конденсатора, замкнутым шунтирующим сопротивлением  $r$ , которое складывается из внутреннего сопротивления контактного перехода и сопротивления материалов экрана и образца. Эксперимент показывает [8], что ударно сжатый диэлектрик ведет себя как генератор тока для значений нагрузочного сопротивления  $R$ , меньших, чем  $R_1 \approx 1000$  ом. Поэтому предполагая, что  $R_1 \gg R + r$  и  $R \gg r$ , определим падение напряжения на внешнем нагрузочном сопротивлении:  $U_1 \approx I_0 r$ . Значения  $P_0$  для диэлектриков достигают  $10^{-3} \text{ к/м}^2$  [8], что при  $r \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$  ом дает величину  $U_1 \sim 1 \div 10$  мв, по-видимому, этой добавкой объясняется большая величина сигнала при  $\alpha=60^\circ$ .

Для того, чтобы полностью исключить влияние диэлектрика во время закрытия УВ перехода, был сделан опыт по схеме рис. 4, б

с углом  $\alpha=90^\circ$ , которому соответствует точка  $U_+(90^\circ)$  на графике рис. 5. Если исключить из рассмотрения значение  $U_+(60^\circ)$ , что оправдывается приведенной выше оценкой влияния изолятора, то можно считать, что э. д. с. от угла не зависит:  $U_+(\alpha) = \text{const}$ .

Статические и динамические источники э. д. с. [4] на контактной поверхности и на ФУВ дают различные сигналы и по-разному проявляют себя при изменении относительной ориентации поверхности контакта и поверхности ФУВ. Анализ опытов позволяет исключить из рассмотрения ряд динамических источников э. д. с. Так, например, из опытов с косым падением УВ следует, что э. д. с. за счет эффекта деформации двойного заряженного слоя на контакте и за счет проскока носителей тока по инерции должна отсутствовать при  $\alpha=90^\circ$ . Отсутствие на осциллограммах роста  $U(t)$  при приближении ФУВ к электроду позволяет исключить влияние эффекта диффузии носителей тока с ФУВ в исследованных материалах образцов. Хотя настоящие опыты не дают оснований полностью исключить возможность эффекта ударной поляризации в механизме возникновения э. д. с., однако попытки объяснить ударной поляризацией э. д. с. при динамическом нагружении исследовавших пар металлов встречаются с рядом трудностей в связи с отсутствием определенных критериев при выборе времен релаксации [4].

В то же время временные характеристики сигналов, совпадение знака э. д. с. со знаком коэффициента термо-э. д. с., соответствие длительности фронтов сигналов кривизне ФУВ и независимость  $U_+$  от  $\alpha$  в опытах с косым падением хорошо объясняются механизмом внутренней контактной разности потенциалов.

Достаточно сильная зависимость э. д. с. от давления в исследованном диапазоне, безынерционность, возможность изготовления датчика с площадью  $< 1 \text{ мм}^2$  позволяют использовать датчики типа, описанных в [3] и в настоящей работе, для измерения пикового давления на ФУВ и обеспечивать локальность измерений, однако измерение профиля давления в волне осложняется разрушением перехода. Кроме того, возможно использование датчика для измерения скорости УВ, как уже отмечалось выше. Описанная методика измерения  $P$  и  $U$  из результатов одного опыта позволяет облегчить калибровку датчика и уменьшить ошибку из-за разброса скоростей ударников и неоднородности ВВ.

Поступила в редакцию  
3/V 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Илюхин, В. Н. Кологривов. ПМТФ, 1962, 5.
2. О. И. Бужинский, С. В. Самыслов. ФТТ, 1969, 11, 10.
3. J. Crosnier, J. Jacquesson, A. Migault. 4-th Symp. on Detonation Proc., U. S. Govt. Print. Off., 1965, p. 627.
4. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов и др. ЖЭТФ, 1971, 61, 1, 254.
5. К. К. Крупников, А. А. Баканова и др. Докл. АН СССР, 1963, 148, 6, 1302.
6. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин ЖЭТФ, 1962, 42, 191.
7. F. E. Allison, J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
8. G. E. Hauger. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.