

которых расположены друг от друга на расстоянии двух своих диаметров, сглаживаются в процессе расширения кольца.

Возмущения границ кольца с волновым числом $\omega = \omega_*$ не изменяются. В процессе деформирования металлического кольца в реальных материалах всегда найдется дефект, который будет способствовать росту рассматриваемого возмущения. Поэтому следует ожидать разрушения металлических колец под действием ВВ в выбранной схеме проведения эксперимента по гармоникам с волновым числом $\omega = \omega_*$, которое определяется через исходные параметры задачи равенствами (6.8), (6.9). При этом критическое ω_* определяет количество осколков разрушенного кольца.

Из (6.8), (6.9) следует, что с увеличением предельной величины логарифмической деформации ϵ_* материала кольца при сохранении постоянными всех остальных характеристик явления количество осколков уменьшается. Рост осколков от величины начальной массовой скорости V_0 линейный. Эти выводы согласуются с экспериментальными данными работы [1].

Интересно отметить, что в случае, когда вся кинетическая энергия кольца расходуется на работу против внутренних сил, в момент разрушения кольца $x = x_*$ скорость разрушения нулевая, а из (3.7) и (6.8) следует $s_* = 0$, когда $\omega_* = 3$. Это минимальное количество осколков, которое может получиться при разрушении металлических колец взрывом. В эксперименте меньше четырех осколков не наблюдалось.

*Поступила в редакцию
19/IV 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Кузнецов. ФГВ, 1973, 9, 4.
2. А. Ю. Ишлинский. ПММ, 1943, VII, 4.
3. В. М. Кузнецов, Е. Н. Шер. ПМТФ, 1964, 2.
4. В. А. Вазов. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений. М., «Мир», 1968.

УДК 532.593

К ВОПРОСУ О СТРУКТУРЕ УДАРНЫХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ

*В. Ф. Нестеренко, А. М. Ставер
(Новосибирск)*

Структура ударной волны с точки зрения упругопластических течений исследовалась в работе [1], где изучено изменение во времени механических характеристик среды при ударном нагружении. Известны работы по исследованию с помощью оптических методов других параметров ударного фронта: температуры, концентрации электронов проводимости [2, 3]. Использование оптических методов для измерения температуры на фронте ударных волн в металлах затруднительно [4]. В настоящей работе для исследования структуры ударных волн в металлах предлагается использовать явления, возникающие при прохождении ударной волной границы двух металлов [5].

В работе [6] было показано, что при нагружении плоской ударной волной пары висмут — металл за несколько десятых микросекунд до

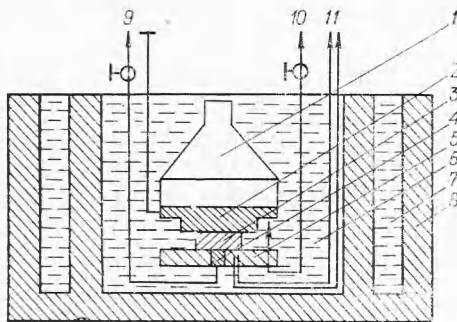


Рис. 1. Схема опытов с охлаждением.
1 — генератор плоской ударной волны; 2 — дюралевый экран; 3 — образец висмута; 4 — латунный электрод; 5 — пластина из оргстекла; 6 — жидкий водород; 7 — жидкий азот; 8 — пенопластовый сосуд; 9 — на вход осциллографа; 10 — на запуск осциллографа; 11 — к термодатчику.

и длина свободного пробега — параметры, существенные, по нашему мнению, для его амплитуды и длительности. Это достигалось путем изменения температуры перед фронтом от 20°K до температуры выше температуры плавления. В работе также изучалась зависимость электрических сигналов от давления в ударной волне. Высказаны предположения о возможности наблюдения данного явления в типичных металлах и приведены некоторые оценки.

На рис. 1 показана схема опыта с охлаждением образцов до 20°K . Экспериментальная сборка вместе с генератором плоской волны помещалась в пенопластовый сосуд, который полностью заполнялся азотом. После охлаждения до 77°K внутренняя полость сосуда заливалась водородом. Температура висмута контролировалась термодатчиком медь — константан. Для опытов при температуре выше 300°C использовалась схема рис. 2. В этих опытах нагрев экспериментальной сборки проводился в специальном устройстве. Между стенкой нагревателя и сборкой размещался цилиндр из асбеста. После достижения необходимой температуры, которая измерялась термодатчиком, нагреватель убирался, заряд ВВ дистанционно опускался на дюралевый экран и производился подрыв.

Для создания ударных волн различной интенсивности использовалась схема с размещением ВВ непосредственно на дюралевом экране, а также схема с нагружением пластиной, разогнанной до определенной скорости. Толщина метаемых пластин выбиралась из условия, чтобы ударная волна опережала волну разгрузки с тыльной стороны ударника на время, достаточное для измерения исследуемого сигнала.

Как отмечалось выше, в некоторых опытах ВВ охлаждалось до низких температур. Поэтому были проведены эксперименты по измерению параметров детонации в этих условиях. Профиль массовой скорости и скорость детонации были

выхода скачка давления из висмута на границу раздела возникает электрический сигнал. На основе представлений о металле как о двухкомпонентной среде, состоящей из электронов и решетки, в работах [7, 8] было показано, что поведение электрических сигналов удовлетворительно согласуется с предположением о развитии в пространстве перед фронтом ударной волны неравновесной тепловой волны, распространяющейся по электронному газу. В настоящей работе с целью дальнейшего изучения этого эффекта изменялись время релаксации электронов по энергии

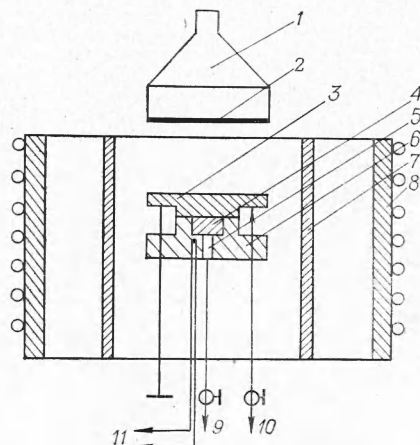


Рис. 2. Схема опытов с нагревом.
1 — генератор плоской ударной волны; 2 — теплоизолирующая прокладка; 3 — дюралевый экран; 4 — образец висмута; 5 — латунный электрод; 6 — асбестовая пластина; 7 — цилиндр из асбеста; 8 — нагреватель; 9 — на вход осциллографа; 10 — на запуск осциллографа; 11 — к термодатчику.

Таблица 1

Толщина образцов, мм	Давление, кбар															
	780		550		450		340		300		240		210		170	
	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂	t ₁	t ₂
3,0	—	—	—	—	—	—	—50	—130	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0	—	—	—	—	—	—	—34	—150	—21	—115	—	—	—	—	—	—
1,5	—36	—150	—40	—68	—27	—170	—34	—120	—	—	—13	—61	—	—	+14	+20
1,0	—	—	—34	—82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,9	—	—	—	—	—	—	—34	—135	—	—	—13	—75	—	—	—	—
0,6	—	—	—	—	—	—	—34	—100	—	—	—	—	+10	—15	—	—
0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+16	+16
0,5	—	—	—	—	—	—	—40	—110	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	—	—	—	—	—	—	—45	—110	—	—	—	—	—	—	—	—

измерены на электромагните [9]. Полученные результаты для литого ТГ 50/50 оказались близкими к параметрам детонации при нормальных условиях. Наблюдалось уширение «химпика» от 0,25 мкс при 300° К до 0,4 мкс при 77° К. Профиль массовой скорости имел треугольный вид с временем спада ~ 1 мкс.

Давление на фронте ударной волны рассчитывалось по известной ударной адиабате висмута [10] и определяемой в экспериментах скорости ударной волны.

Были получены осциллограммы изменения тока в измерительной цепи в зависимости от времени (на рисунках метки времени 10 МГц). На рис. 3 показана осциллограмма, полученная при температуре 20° К и давлении 340 кбар. На рис. 4, а—д приведены осциллограммы сигналов для разных давлений и температуре перед фронтом 300° К. На рис. 5, а, б приведены осциллограммы опытов при 343 и 458° К и давлении 340 кбар. Момент времени t_1 соответствует входу ударной волны в образец, момент t_2 — выходу.

В табл. 1 приведены амплитуды сигналов в милливольтках, измеренные при различных давлениях и толщинах образцов при $T=300^\circ\text{К}$, а в табл. 2 даны результаты опытов для различных температур при давлении 340 кбар. Значения величин амплитуды в таблицах 1, 2 соответствуют максимальным зарегистрированным величинам ЭДС. В экспериментах разброс значений ЭДС достигал 30% от максимального.

Таблица 2

Толщина образцов, мм	$T_0, ^\circ\text{K}$											
	653		458		343		300		77		20	
	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
3,0	—	—	—	—	—	—	—50	—130	—	—	—45	—510
2,3	—	—	—	—	—28	—94	—	—	—	—	—	—
2,1	—	—	—28	—47	—	—	—	—	—	—	—	—
2	<10	<10	—	—	—	—	—34	—150	—60	—430	—50	—510
1,5	—	—	—	—	—	—	—34	—120	—	—	—	—
0,9	—	—	—	—	—	—	—34	—135	—	—	—48	—270
0,6	—	—	—	—	—	—	—34	—100	—	—	—	—
0,5	—	—	—	—	—	—	—40	—110	—	—	—50	—270

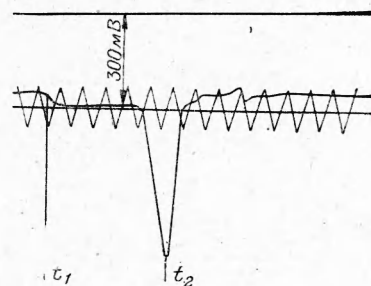


Рис. 3. Изменение ЭДС во времени при давлении 340 кбар, $T_0 = 20^\circ \text{K}$, $\delta = 2 \text{ мм}$.

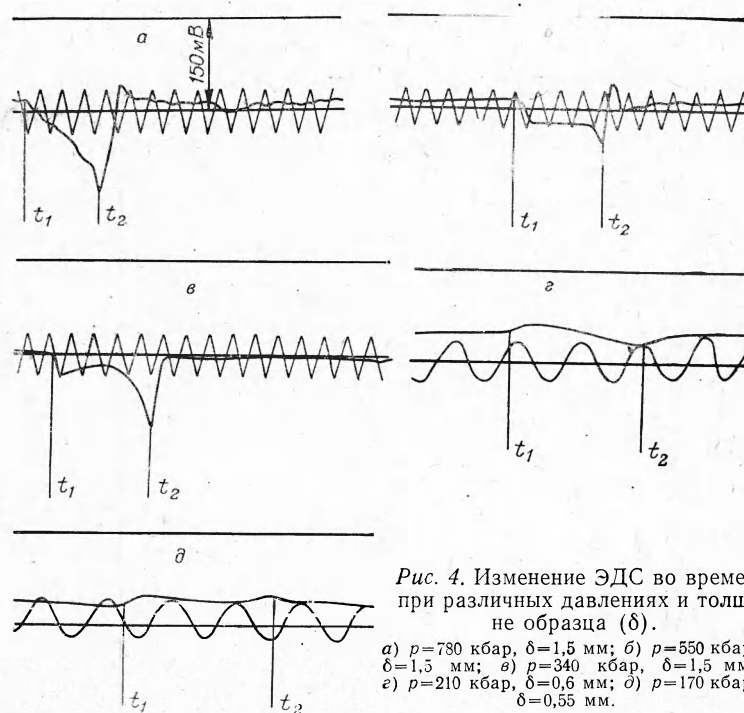


Рис. 4. Изменение ЭДС во времени при различных давлениях и толщине образца (δ).

а) $p = 780 \text{ кбар}$, $\delta = 1,5 \text{ мм}$; б) $p = 550 \text{ кбар}$, $\delta = 1,5 \text{ мм}$; в) $p = 340 \text{ кбар}$, $\delta = 1,5 \text{ мм}$; г) $p = 210 \text{ кбар}$, $\delta = 0,6 \text{ мм}$; д) $p = 170 \text{ кбар}$, $\delta = 0,55 \text{ мм}$.

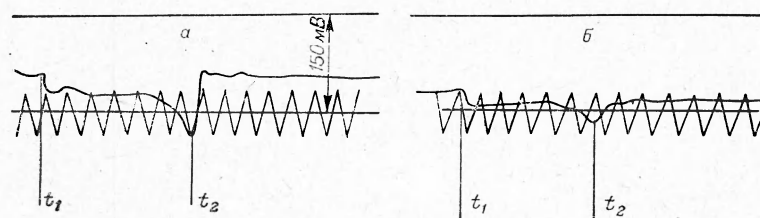


Рис. 5. Изменение ЭДС во времени при давлении 340 кбар.

а) $T_0 = 343^\circ \text{K}$, $\delta = 2,3 \text{ мм}$; б) $T_0 = 458^\circ \text{K}$, $\delta = 2,1 \text{ мм}$.

Из осциллограмм и таблиц видно, что изменение температуры материала перед фронтом ударной волны от 300 до 77° К приводит к увеличению амплитуды сигнала более чем в 3 раза без существенного изменения его длительности. Дальнейшее уменьшение температуры до 20° К не оказывает на амплитуду сигнала существенного влияния. Увеличение температуры от 300° К приводит к уменьшению амплитуды сигнала тоже без существенного изменения его длительности. При ударном нагружении пары дюраль — расплавленный висмут сигнал не наблюдается. С уменьшением давления от 340 до 210 кбар амплитуда сигнала уменьшалась. При $p=210$ кбар изменялась полярность сигнала в момент t_1 . При $p=170$ кбар как сигнал входа, так и сигнал выхода имеют положительную полярность. При $p=550$ кбар сигнал резко уменьшался по амплитуде по сравнению с 340 кбар, при дальнейшем увеличении давления его амплитуда увеличивалась.

Обсуждение результатов

Рассмотрим возможные причины изменения величины сигнала при охлаждении образцов.

При изменении температуры металла перед фронтом ударной волны существенно изменяется длина свободного пробега электронов для рассеяния на решетке — l_s , которая оказывает влияние на распространение тепловой волны. Нелинейная зависимость τ_s для Вi [11] от температуры решетки T_p обуславливает зависимость времени релаксации по энергии τ_s от T_p [12], что должно приводить к уменьшению затухания тепловой волны с уменьшением температуры решетки. В температурном интервале 300—77° К l_s изменяется как T_p^{-2} , а τ_s увеличивается примерно в 5 раз. Это, по-видимому, и приводит к увеличению амплитуды регистрируемого сигнала.

Для объяснения причины слабой зависимости длины регистрируемого сигнала от начальной температуры предполагается, что существенными для рассеяния электронов являются либо статические дефекты, либо электрон-электронное рассеяние. В температурном интервале 77—20° К также происходит значительное изменение величин l_s и τ_s . Однако сигнал при этом изменяется несущественно. Это, по-видимому, связано с тем, что затухание тепловой волны при 77° К является слабым. Из наблюдаемой зависимости амплитуды сигнала от температуры перед фронтом можно сделать вывод, что регистрируемый максимум сигнала при 300° К не соответствует температуре за фронтом ударной волны, поскольку последняя при охлаждении металла изменяется несущественно. Поэтому можно предположить, что при 300° К перед фронтом ударной волны на расстоянии от него меньше 0,1 мм происходит сильное затухание тепловой волны и эта часть профиля не разрешается измерительной схемой. Предполагаемый профиль тепловой волны при разных начальных температурах образца показан на рис. 6. Заметим, что определить температуру из проведенных измерений трудно как из-за отсутствия данных по величине и зависимости коэффициента термо-ЭДС Вi от температуры, так и из-за искажений профиля тепловой волны на контакте двух металлов с сильно различающимися тепло-физическими свойствами. Возможна лишь оценка температуры по порядку величины [7].

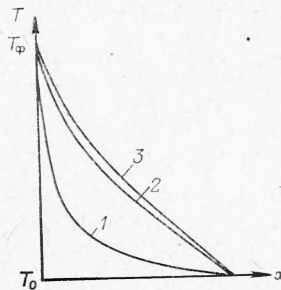


Рис. 6. Предполагаемый профиль электронной температуры в пространстве перед гидродинамическим разрывом.
 T_0 , °К: 1 — 300; 2 — 77; 3 — 20.

В работе [7] отмечалось, что тепловой предвестник возможен и в типичных металлах при их охлаждении до температур порядка нескольких градусов. Для этих исследований должны выбираться чистые материалы.

При $\sim 4^\circ \text{K}$ теплоемкость решетки меньше теплоемкости электронного газа вследствие более сильной зависимости от температуры [13], поэтому скорость распространения тепловых волн в металле даже в равновесном случае при равенстве электронной и решеточной температур определяется электронным коэффициентом температуропроводности, равным $a = \frac{lv}{3}$, где l — длина свободного пробега электронов по энергии, а v — скорость. Для чистых металлов l может достигать при 4°K значений $\sim 10^{-3}$ см [14], v слабо зависит от температуры и имеет значение $\sim 10^8$ см/с, а $a \sim 10^5$ см²/с. Коэффициент температуропроводности металлов при температуре порядка нескольких градусов, определенный из экспериментально известных электронной теплоемкости и теплопроводности, составляет величину $10^4 - 10^5$ см²/с [13], что обеспечивает размер зоны прогрева перед фронтом ударной волны порядка миллиметра.

Таким образом, предположение, сделанное в работе [7], о возможности возникновения в типичных металлах перед фронтом ударной волны тепловой волны является оправданным. Следует отметить, что равновесный коэффициент температуропроводности металла уменьшается с увеличением температуры, это связано с сильной зависимостью решеточной теплоемкости и длины свободного пробега от температуры. При более низких температурах ($\sim 1^\circ \text{K}$), когда τ_e будет достаточно велико ($\sim 10^{-7}$ с), возможно появление неравновесной тепловой волны на разрешаемом аппаратурой расстоянии от фронта ударной волны. Данное явление может быть использовано для определения температур на фронте ударной волны. Развитым выше представлениям соответствует уменьшение величины сигнала при увеличении температуры вистмута от 300°K до $T_{\text{пл}}$. При $T > T_{\text{пл}}$ Bi по своим свойствам становится типичным металлом с длиной свободного пробега электронов $\sim 10^{-3}$ см, эффективной массой порядка массы свободного электрона и числом электронов проводимости $\sim 10^{22}$ см⁻³ [15]. Это должно приводить к исчезновению предвестника, что и наблюдалось в эксперименте.

Поведение сигналов при изменении давления во фронте ударной волны имеет сложный характер [16]. При уменьшении давления от 340 до 210 кбар наблюдается уменьшение амплитуды сигнала предвестника. При 210 кбар происходит изменение полярности сигнала в момент t_1 . При давлении 170 кбар как сигнал в момент t_1 , так и сигнал в момент t_2 имеют положительную полярность. При давлении 550 кбар амплитуда сигнала меньше, чем при 340 и 780 кбар. Наблюдаемые особенности поведения исследуемых сигналов проявляются в области давлений, соответствующих фазовым переходам [10]. Одной из причин уменьшения амплитуды сигналов предвестника при увеличении давления может быть возникновение на фронте ударной волны задерживающего потенциала из-за различия уровня Ферми за и перед фронтом.

Явление изменения полярности сигналов и немоного их поведения может быть использовано для определения возможных фазовых переходов.

Поступила в редакцию
18/III 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Мак-Куин, С. Марш и др. В кн. «Высокоскоростные ударные явления». М., «Мир», 1973.
 2. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, В. Д. Урлин. ЖЭТФ, 1968, 55, 5 (11).
 3. С. Б. Кормер. УФН, 1968, 94, 4.
 4. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М., «Наука», 1966.
 5. В. С. Илюхин, В. Н. Кологривов. ПМТФ, 1962, 5.
 6. А. Г. Иванов, В. Н. Минеев и др. Письма ЖЭТФ, 1968, 6, 191.
 7. В. Ф. Нестеренко. ФГВ, 1974, 10, 5.
 8. В. Ф. Нестеренко, А. М. Ставер, Б. К. Стырон. ФГВ, 1973, 9, 3, 433.
 9. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
 10. R. G. McQueen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 1253.
 11. T. Okado. J. Phys. Soc. Japan, 1957, 12, 1327.
 12. R. F. Greene. J. electronics and control, 1957, 3, 4.
 13. Ф. Блатт. Физика электронной проводимости в твердых телах. М., «Мир», 1971.
 14. В. Л. Гинзбург, В. П. Силин. ЖЭТФ, 1955, 29, 7.
 15. Т. Фабер. Физика металлов. М., «Мир», 1972.
 16. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов, Ю. Н. Тюняев. В сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
-