УДК 550.32

СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ФТОРОПЛАСТА В УДАРНОЙ ВОЛНЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ 51 ГПа

С. А. Бордзиловский[1,2], С. М. Караханов[1]

[1]Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru
[2]Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Проведен анализ локализации источников излучения, возникающих при ударном нагружении фторопласта до высоких давлений. Установлено сильное влияние состояния контактной поверхности границы экран — образец на профиль импульса излучения. Проведена коррелированная по времени регистрация профилей давления и излучения, а также профилей электросопротивления образца фторопласта, позволившая определить моменты возникновения и длительность сигналов излучения. Проведен расчет формы импульса излучения с некоторыми упрощающими предположениями об излучательной способности ударно-сжатой части образца. Установлено, что в зависимости от состояния контактной поверхности перед фронтом ударной волны возникает зона, в которой электросопротивление фторопласта уменьшается на 9–10 порядков величины. Высказано предположение о возникновении впереди фронта ударной волны волны фотопроводимости, индуцированной светом.

Ключевые слова: ударно-индуцированное излучение, фторопласт, фотопроводимость, электросопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение ударно-индуцированного излучения прозрачных и частично прозрачных веществ дает информацию о состоянии вещества при ударном сжатии. Особый интерес к проведению таких исследований связан с определением температуры в ударных [1] и детонационных волнах [2].

Световое излучение ударно-сжатых веществ исследовалось методами оптической пирометрии, а также с помощью импульсных спектрометров [3–8]. В этих работах показано, что в ряде исследованных веществ яркостная температура превышает температуру, рассчитанную по уравнению состояния в предположении термодинамического равновесия вещества за фронтом волны. Регистрируемые спектры ударно-индуцированного излучения также отличаются от спектра излучения абсолютно черного или серого тела. В частности, для тефлона этот факт экспериментально установлен при проведении спектрометрических исследований в [8]. Анализ профилей ударно-индуцированного излучения кристаллических образцов NaCl [4] и воды [5] показал, что излучение обусловлено двумя возможными локализациями источников: на контактной границе экран — образец и в объеме вещества за фронтом ударной волны (УВ). При распространении УВ по веществу происходит наложение излучений от этих двух типов источников.

При исследовании ударно-индуцированного излучения в политетрафторэтилене (ПТФЭ, фторопласт) обнаружилось сильное влияние качества подготовки контактной поверхности между металлической пластиной, подводящей УВ, и частично прозрачным образцом на регистрируемый профиль светового излучения [9]. В проведенных исследованиях были максимально устранены неоднородности на контакте, а контактный промежуток заполнен иммерсионной жидкостью. Это позволило частично разделить вклад контактных и объемных источников излучения во фторопласте и зарегистрировать рост интенсивности излучения по мере распространения УВ по образцу. Полученные временны́е зависимости находились в качественном согласии с законом поглощения Бугера — Ламберта в предположении постоянного коэффициента поглощения в полимере перед фронтом УВ.

Разделение вклада контактных и объемных источников излучения является важной задачей при проведении пирометрических измерений в УВ. При ударном сжатии на контакт-

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента РФ (грант № НШ-8583.2006.1).

ной поверхности возникают сильные неоднородности, приводящие к неравномерному распределению температуры по поверхности контакта. Один из механизмов, которые создают высокие локальные температуры в отдельных точках контакта, связан с частичной разгрузкой вещества в щель с его последующим дожатием второй УВ [10]. При схлопывании контактного зазора вблизи поверхности раздела возникает трехмерное течение, которое приводит к захвату воздуха микропорами и включает механизм вязкопластического разогрева внутренней поверхности пор [11]. Отметим также разогрев поверхности границы за счет торможения микроструй [12], разлетающихся с поверхности верхней пластины. Все эти механизмы создают вблизи контактной поверхности значительные термические неоднородности, температура которых превышает равновесную температуру сплошного материала. В теории инициирования гетерогенных ВВ такие очаги с локально повышенной температурой получили название «горячих точек». Известны также попытки измерить температуру металлов за фронтом УВ термопарным методом; измеренные температуры превышали значение, полученное в термодинамическом расчете, что объяснялось несовершенством контакта [13]. Следует заметить, что релаксация температуры в таких локальных очагах происходит за счет радиационного излучения и по механизму теплопроводности. Проведенные в [14] оценки показали, что в условиях ударного сжатия скорость охлаждения очага по механизму теплопроводности намного выше скорости радиационного охлаждения. Вследствие малого значения коэффициента температуропроводности фторопласта ($\chi = 3.24 \cdot 10^{-4}$ см^2/с при нормальных условиях [15]) время остывания «горячих точек» с характерным размером $\approx$1 мкм составляет $\approx$30 мкс, т. е. достаточно медленно по сравнению с временами ударного нагружения образцов $\approx 2 \div 3$ мкс. Другой тип источников света в УВ связан с неравновесным излучением, к которым можно отнести люминесценцию и излучение в результате химических реакций за фронтом УВ. Вклад этих механизмов в ударно-индуцированное излучение NaCl и воды ранее обсуждался в [4, 5]. Отличие спектра излучения ударно-сжатого тефлона при 17 ГПа от спектра излучения абсолютно черного тела объяснялось деструкцией полимера в УВ [8], что также можно отнести к неравновесному излучению.

Цель данной работы — экспериментальное исследование светового излучения фторопласта при нагружении УВ интенсивностью 51 ГПа, что заведомо превышает порог деструкции тефлона $\approx$34 ГПа [16]. Были повторены эксперименты [9], в которых определялось, как влияет качество подготовки контактной поверхности на характер светового излучения. Для выяснения локализации зоны излучения проводились опыты по определению временно́й корреляции между излучением и моментом входа УВ в образец фторопласта.

Другой аспект исследований — сопоставление профиля ударно-индуцированного излучения с измерениями проводимости фторопласта. В [17] обнаружено, что линейная зависимость электросопротивления от толщины образца нарушается при толщине образца больше 1 мм. Для проверки возможного влияния излучения на электросопротивление образцов проведены опыты, в которых осуществлялась временна́я привязка сигналов излучения к моменту достижения заметной проводимости образца.

Применение методов оптической пирометрии в ударно-волновом эксперименте требует корректного сопоставления регистрируемых профилей сигналов излучения с гидродинамической схемой сжатия. В данной работе проводилось сопоставление профиля излучения во фторопласте с расчетом, выполненным по методу, предложенному в [18].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментов показана на рис. 1. Дюралюминиевый ударник толщиной 5 мм,

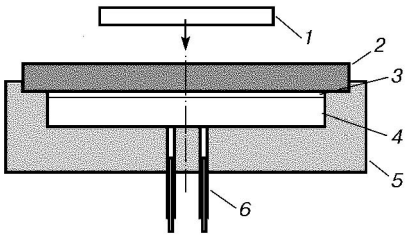

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — ударник, *2* — экран, *3* — манганиновый датчик с изоляцией (только в опытах с временно́й привязкой сигнала излучения к импульсу давления), *4* — образец фторопласта, *5* — обойма, *6* — световоды

разгоняемый продуктами взрыва до скорости 5.4 км/с, создавал УВ в дюралюминиевом экране толщиной 5 мм, которая затем проходила в образец толщиной $l = 5 \div 10$ мм, изготовленный из фторопласта-4. Параметры УВ во фторопласте, рассчитанные по его ударной адиабате $u_s = 1.682 + 1.819u_p$, $\rho = 2.15$ г/см^3 [19], следующие: скорость УВ $u_s = 7.47$ км/с, массовая скорость $u_p = 3.18$ км/с, давление $p = 51$ ГПа. Интенсивность УВ в экране составляла ≈65 ГПа. Для предотвращения регистрации свечения от разлетающихся продуктов взрыва образец был полностью заключен в металлическую обойму. К торцу образца примыкали два световода из пластикового оптоволокна с диаметром сердцевины 1 мм. Согласно техническим характеристикам затухание в оптоволокне составляло $0.25 \div 0.1$ дБ/м в диапазоне длин волн $400 \div 600$ нм. Излучение через оптоволокно выводилось из взрывной камеры и далее через нейтральный светофильтр НС10 передавалось на два ФЭУ-36 с сурьмяно-цезиевым катодом, спектральная чувствительность которых резко падает при длине волны $\geqslant 600$ нм. Временно́е разрешение схемы регистрации составляло ≈25 нс.

Для проверки работоспособности схемы регистрации был поставлен опыт, в котором в качестве образца использовалась полированная стеклянная измерительная пластина высотой 25 мм и диаметром 80 мм. Поверхность алюминиевого экрана полировалась, а зазор заполнялся иммерсионным маслом. Осциллограмма этого опыта приведена на рис. 2. Здесь и далее U — напряжение, снимаемое с нагрузочного сопротивления ФЭУ. Зависимость амплитуды сигнала от времени аналогична профилю сигналов свечения фронта УВ в NaCl [1] и позволяет выделить фазу нарастания яркости свечения за счет увеличения слоя ударно-сжатого вещества, фазу постоянного свечения и начиная с $t_1 - t_0 \approx 1.4$ мкс фазу уменьшения яркости вследствие влияния догоняющей разгрузки. В момент $t_2 - t_0 \approx 4$ мкс УВ выходит на свободную поверхность стекла, что вызывает свечение воздушной УВ, которое регистрируется ФЭУ.

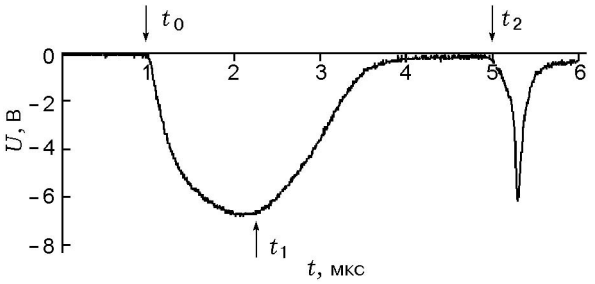

Рис. 2. Световое излучение стекла:

t_0 — момент входа УВ в образец, t_1 — время, за которое разгрузка догоняет фронт, t_2 — время выхода УВ на свободную поверхность

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМУ СИГНАЛА ИЗЛУЧЕНИЯ

Поверхность верхней дюралюминиевой пластины, контактировавшей с образцом, полировалась, а поверхность фторопластового образца обрабатывалась на станке мокрого шлифования до неоднородностей высотой ≈10 мкм. В ряде опытов пластина и образец нагревались вместе в сжатом состоянии до 230 °C и затем в сжатом состоянии охлаждались. После охлаждения поверхность образца имела блеск, характерный для полированной поверхности. Профили излучения при любом из этих двух способов обработки контактирующей поверхности образца имели асимметричную колоколообразную форму (кривая *1*, рис. 3). Длительность импульса излучения ≈0.2 мкс (ширина на половине высоты), что значительно меньше времени прохождения УВ по образцу, которое в этом опыте составляло 1.07 мкс.

Полученный результат можно связать с «контактным» излучением как нетеплового (люминесценция, химическая реакция, деструкция полимера), так и теплового характера. Независимо от причин, вызывающих контактное излучение, при регистрации излучения с торца образца должно проявиться экранирующее влияние слоя ударно-сжатого фторопласта, расположенного между контактной поверхностью и световодами. Похожее явление экранировки излучения из зоны контакта за счет поглощения в ударно-сжатой части образца наблюдалось при исследовании ударно-индуцированного излучения частично прозрачного минерала энстатита в [3]. Однако в отличие от сигналов с энстатита, на которых вслед за пиком свечения из зоны контакта следует постоянный уровень сигнала, связанный со свечением фронта УВ, в наших опытах происходила полная экранировка свечения через ≈0.5 мкс от момента входа УВ в образец.

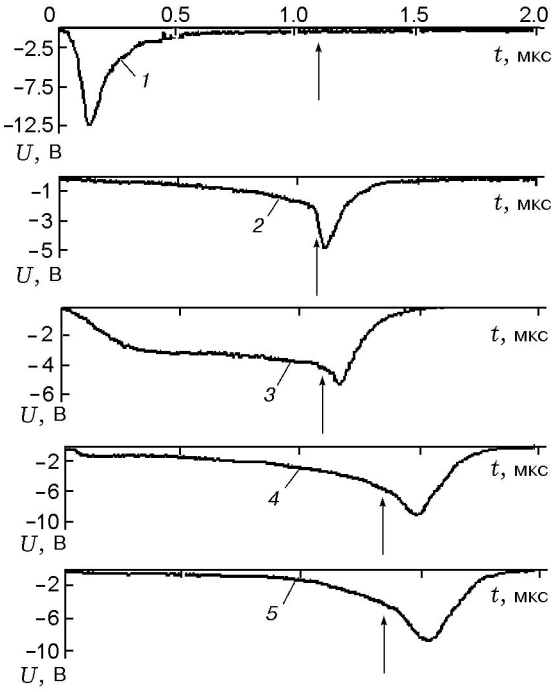

Рис. 3. Временна́я зависимость светового излучения при различном качестве контактирующих поверхностей:

1 — контактный зазор заполнен воздухом, *2–5* — кедровым маслом; *1–3* — $l = 8$ мм; *4*, *5* — $l = 10$ мм; УВ входит в образец при $t = 0$; стрелками обозначены моменты времени, соответствующие выходу УВ из образцов

Для устранения свечения воздуха в зазоре между экраном и образцом были поставлены опыты с заполнением контактного зазора иммерсионной жидкостью — кедровым маслом. Осциллограммы таких опытов приведены на рис. 3 (кривые *2–5*). Отметим, что характер временно́й зависимости сигналов светового излучения и их амплитуда резко изменились. После прохождения фронтом УВ границы экран — образец можно выделить две фазы плавного роста амплитуды сигнала. В первой фазе сигнал обычно нарастал за $0.1 \div 0.3$ мкс до некоторой амплитуды, которая составляла $10 \div 50$ % от максимальной. Во второй фазе скорость нарастания амплитуды уменьшалась и далее сигнал нарастал экспоненциально до максимальной амплитуды. Длительность сигнала несколько превышала расчетное время прохождения УВ через образец. Если предположить, что во второй фазе сигнала регистрируется постоянный поток излучения с фронта УВ, а толщина слоя несжатого фторопласта перед фронтом линейно уменьшается во времени, то наблюдаемый рост сигнала находится в качественном соответствии с законом поглощения Бугера — Ламберта. Заполнение зазора иммерсионным маслом устраняло свечение воздуха. Однако наблюдаемый разброс амплитуд сигналов в первой фазе (в течение ≈0.3 мкс) свидетельствует о том, что полностью устранить контактное свечение не удавалось. Различие динамических импедансов фторопласта и иммерсионного масла наряду с шероховатостями на поверхности фторопласта сохраняли условия, при которых на контакте возможно формирование локальных перегретых очагов. Наличие жидкой прослойки также не устраняло возможный механизм торможения микроструй с поверхности экрана.

ВРЕМЕННА́Я ПРИВЯЗКА СИГНАЛА ИЗЛУЧЕНИЯ К ИМПУЛЬСУ ДАВЛЕНИЯ

Для определения момента возникновения импульса излучения проводилась временна́я привязка сигнала излучения к профилю давления на границе. Опыты ставились в геометрии, показанной на рис. 1. Между экраном и образцом располагался манганиновый датчик, изолированный от экрана слоем фторопласта толщиной ≈1 мм. Датчик вклеивался эпоксидной смолой. Несмотря на заполнение зазоров смолой, число неоднородностей, способствующих появлению «горячих точек» в этом опыте, могло только возрасти, поскольку появилась дополнительная граница между двумя слоями

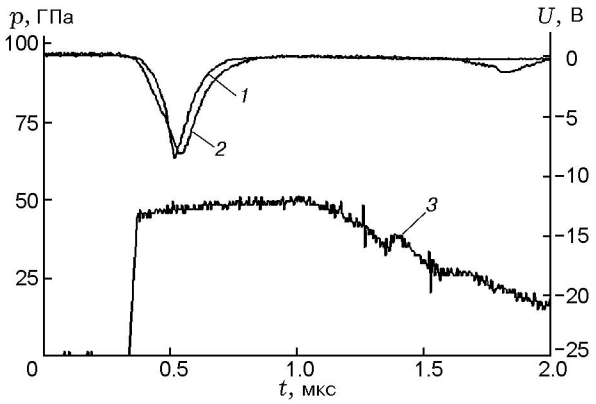

Рис. 4. Привязка сигнала излучения к импульсу давления:

1, *2* — импульсы излучения, *3* — профиль давления, зарегистрированный манганиновым датчиком; $l = 6$ мм

изоляции, а толщина эпоксидной смолы вблизи датчика составляла до 40 мкм. Кроме того, эпоксидная смола, очевидно, содержала микропузырьки газа, поскольку специальных мер по дегазации смолы не применялось. Осциллограммы опыта приведены на рис. 4. Сигнал давления от манганинового датчика (кривая *3*) был сдвинут на 80 нс влево для того, чтобы учесть время прохождения импульса давления по верхней изолирующей прокладке толщиной 1 мм (≈134 нс) и время задержки светового импульса в ФЭУ (≈55 нс). Из сопоставления сигналов видно, что передний фронт импульса давления практически совпадает с началом нарастания излучения (кривые *1* и *2*). Точность временно́й привязки можно оценить временны́м разрешением ФЭУ (≈25 нс). Разброс между 1-м и 2-м сигналами в этом эксперименте примерно совпадает с временны́м разрешением ФЭУ. Сигнал давления во фторопласте имеет характерный для упруговязких тел профиль, состоящий из скачка до 95 % от равновесной амплитуды и зоны релаксации сдвиговых напряжений в течение ≈0.6 мкс. Волна разгрузки приходит в область расположения манганинового датчика через ≈0.65 мкс, что позволяет считать условия на верхнем контакте стационарными в течение времени регистрации излучения. На разгрузке виден пик давления (через ≈1 мкс от переднего фронта), вызванный отражением УВ от границы образец — обойма. Световое излучение усиливается в течение ≈0.2 мкс после прохождения УВ границы (см. рис. 4, кривые *1*, *2*), а затем затухает через ≈0.4 мкс. На осциллограмме излучения отсутствует также свечение воздушной ударной волны, возникающей при выходе УВ в образце на его торец (ожидаемое время 0.67 мкс).

Временны́е характеристики профилей излучения в этом опыте совпадают с данными, полученными в опытах с «воздушным» контактным зазором (кривая *1* на рис. 3). Наблюдаемая зависимость излучения от времени в обоих случаях позволяет предположить, что между фронтом УВ и световодами существует зона сильного поглощения излучения, которая экранирует световой поток как из зоны контакта, так и с фронта УВ. Возникновение такой зоны должно сопровождаться появлением заметной проводимости фторопласта. Для проверки этого предположения в третьей серии опытов одновременно с регистрацией сигнала светового излучения измерялось электросопротивление образца фторопласта во время прохождения по нему ударной волны.

ВРЕМЕННА́Я ПРИВЯЗКА СИГНАЛОВ ИЗЛУЧЕНИЯ К ПОЯВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ ОБРАЗЦА

Для определения сопротивления ударносжатого образца R_x применялась схема с импульсным источником тока, которая является типичной при измерении электросопротивления в переходах типа диэлектрик — полупроводник [20]. Схема экспериментов показана на рис. 5. Образец помещен между двумя электродами, на которые за ≈10 мкс до прихода УВ на верхнюю границу раздела подается импульс электрического напряжения. Электрическая измерительная цепь описана в [17]. Номиналы C, R_1, R_2, R_3, и $R_н$ указаны в подписи к рис. 5. Вспомогательные резисторы R_4 и R_5 устанавливались на измерительной ячейке и позволяли выбрать килоомный диапазон для определения R_x. Сопротивление $R_x(t)$ рассчитывалось по отношению амплитуд $U_x(t)/U_0$, где U_0 — напряжение, измеряемое на нагрузочном сопротивлении до прихода УВ (рис. 6,*а*,

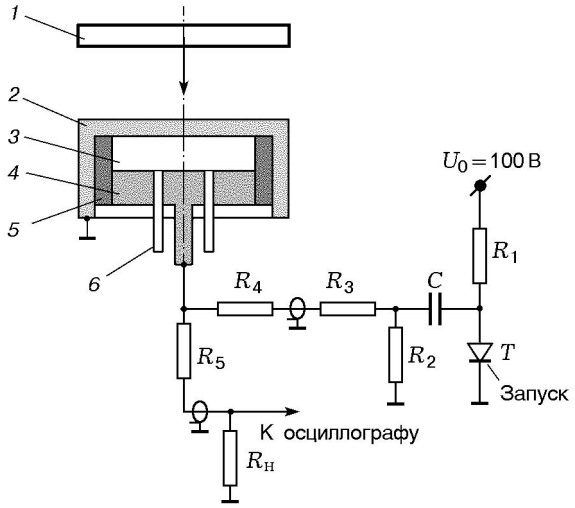

Рис. 5. Схема экспериментов для временно́й привязки сигналов излучения и электросопротивления образца:

1 — ударник, *2* — верхняя пластина (электрод), *3* — образец, *4* — второй электрод, *5* — изолятор, *6* — световоды; T — тиристор; C = 10 мкФ — накопительная емкость; R_1 = 20 кОм, R_2 = 88 Ом, R_3 = 100 Ом, $R_н$ = 75 Ом — нагрузочное сопротивление, R_4 и R_5 — вспомогательные резисторы, определявшие диапазон измеряемых сопротивлений

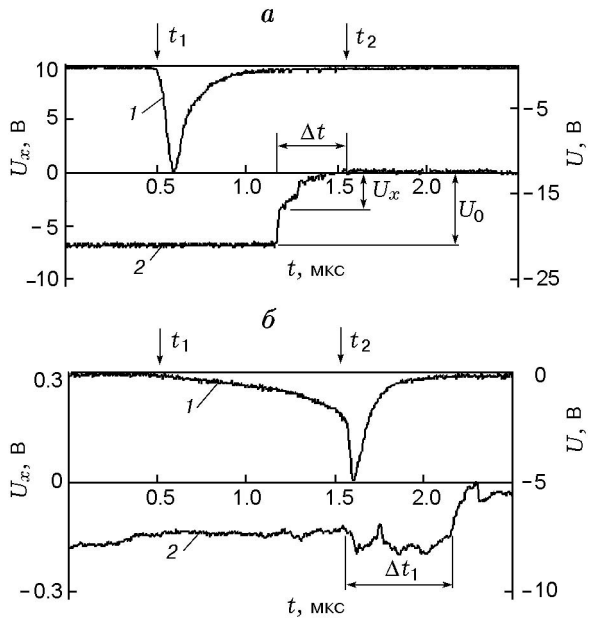

Рис. 6. Временна́я привязка сигналов светового излучения (кривые *1*) и напряжения на измерительной ячейке (кривые *2*):

а — опыт с «воздушным зазором», *б* — опыт с зазором, заполненным иммерсионным маслом; t_1 и t_2 — времена прохождения ударной волной верхнего и нижнего контактов соответственно

кривая *2*). Опыты проводились для двух типов контакта: с «воздушным зазором» и с заполнением зазора иммерсионным маслом. В экспериментах с «воздушным контактным зазором» обнаружено, что сопротивление образца резко падает до значений $R_x \approx 3$ кОм примерно за 0.4 мкс до выхода УВ на второй электрод (рис. 6,*а*, кривая *2*). Среднее значение опережения в 5 опытах составляло $\Delta t = 0.29 \pm 0.07$ мкс, что соответствует пространственному опережению ударного фронта волной электропроводности ($\rho_x \approx 2.7 \cdot 10^4$ Ом·см) примерно на 2 мм. Можно предположить, что появление волны электропроводности перед фронтом УВ связано с эффектом фотопроводимости, индуцированной интенсивной световой вспышкой. Эффект фотопроводимости полимеров известен в статических экспериментах и возникает при интенсивном облучении ультрафиолетовым излучением [21]. Появление в спектре излучения ультрафиолетовой составляющей может быть связано с неравновесным излучением из зоны контакта либо со значительным превышением температуры горячих точек над средней температурой фторопласта, которая при давлении 51 ГПа равна ≈3 000 К [16]. В работе [8] спектр излучения тефлона при ударном сжатии ≈17 ГПа подгонялся к закону излучения абсолютно черного тела с температурой 5 875 К. При устранении излучения от контактной границы за счет заполнения зазора иммерсионным маслом эффект опережения ударного фронта волной электропроводности не наблюдался. В этом случае сигнал светового импульса экспоненциально нарастал (см. рис. 6,*б*, кривая *1*), а напряжение на ячейке оставалось в пределах электрических шумов на постоянном уровне (см. рис. 6,*б*, кривая *2*). Спад сигнала напряжения на ячейке запаздывал примерно на $\Delta t_1 = 0.56$ мкс по отношению к времени выхода УВ на второй электрод. Расчет по (x–t)-диаграмме показал, что к этому моменту вторичная УВ успевает отразиться от верхнего электрода и по образцу движется третья УВ.

ВРЕМЕННА́Я ЗАВИСИМОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПЫТАХ С УЛУЧШЕННЫМ КАЧЕСТВОМ КОНТАКТА

Вторая постановка экспериментов с заполнением зазора иммерсионным маслом допускает более простую интерпретацию с точки зрения источников излучения и зон поглощения света. При проведении экспериментов в схеме, показанной на рис. 1, регистрировался поток излучения с торца образца, поэтому вклад в сигнал при движении УВ по образцу могут вносить такие источники, как тепловое излучение верхней пластины-экрана, излучение из зоны контактной границы, излучение ударно-сжатого фторопласта за фронтом УВ. Световой поток при распространении УВ по образцу поглощается как в ударно-сжатой, так и в ненагруженной части образца. При скорости ударника 5.4 км/с температура экрана по расчетам [22] не превышала 1 750 К. Кроме того, при распаде разрыва температура алюминия понижалась в волне разгрузки. В то же время температура отдельных участков зоны контакта вследствие ее неоднородного распределения может значительно превышать равновесную температуру, рассчитанную по уравнениям состояния дюралюминия и фторопласта. Как отмечалось выше, оценка равновесной температуры фторопласта за фронтом УВ интенсивностью 51 ГПа дает примерно 3 000 К. Поэтому в первом приближении можно ограничиться рассмотрением вкладов в излучение от двух источников: теплового излучения за счет

неоднородной температуры в зоне контакта и излучения ударно-сжатой части фторопласта.

Осциллограммы *2–5* на рис. 3 показывают, что излучение появляется в момент входа УВ в образец. Скорость роста сигнала резко замедляется через $0.1 \div 0.3$ мкс и в дальнейшем наблюдается близкий к экспоненциальному рост амплитуды сигнала. После выхода УВ на тыльную поверхность образца амплитуда сигнала продолжает нарастать, что, по-видимому, связано со свечением УВ в воздухе, однако эта стадия сигнала не рассматривается. Фаза сигнала, начиная от 0.5 мкс и до выхода УВ в воздух, достаточно хорошо описывается законом Бугера — Ламберта в предположении, что постоянный во времени световой поток с фронта УВ [9] поглощается в несжатой части фторопласта. Однако временну́ю зависимость сигнала от момента входа УВ в образец до $0.1 \div 0.3$ мкс этот закон не описывает. Поэтому в данной работе предпринята попытка интерпретировать форму сигнала в рамках схемы расчета [18], в которую введены два дополнительных фактора, влияющие на временну́ю зависимость эффективного сигнала излучения, — это излучение из зоны контакта и поглощение этого излучения в ударно-сжатой части образца.

Эффективный световой поток от контактной границы, который регистрируется с тыльного торца образца, можно записать в виде

$$I_c^*(t) = I_c^0 \mathrm{e}^{-\alpha_1 d_1} \mathrm{e}^{-\alpha_2 d_2}, \qquad (1)$$

где I_c^0 — постоянный во времени световой поток из зоны контакта (здесь и далее рассматриваются световые потоки, осредненные по частотам в полосе пропускания измерительного тракта $400 \div 600$ нм); α_1, α_2 — коэффициенты поглощения ударно-сжатого и ненагруженного фторопласта соответственно; $d_1 = (u_s - u_p)t$ — толщина ударно-сжатого слоя фторопласта; $d_2 = l - u_s t$ — толщина ненагруженного слоя фторопласта.

Эффективный световой поток из ударно-сжатой части образца описывается соотношением

$$I_{sh}^*(t) = I_{sh}^0 (1 - \mathrm{e}^{-\alpha_1 d_1}) \mathrm{e}^{-\alpha_2 d_2}, \qquad (2)$$

где $I_{sh}^0(1 - \mathrm{e}^{-\alpha_1 d_1})$ — световой поток из ударно-сжатой части образца, который представлен в виде произведения светового потока абсолютно черного тела I_{sh}^0 и излучательной способности плоского неотражающего слоя толщиной d_1, которая равна поглощающей способности этого слоя [18]: $\varepsilon_{sh} = 1 - \mathrm{e}^{-\alpha_1 d_1}$. Для толщин ударно-сжатой части образца $\Delta x \gg 1/\alpha_1$ излучательная способность составляет $\varepsilon_{sh} \cong 1$ и фронт УВ рассматривается в таком приближении как абсолютно черное тело [3].

Результаты расчета временно́й зависимости формы сигнала в этом приближении показаны на рис. 7 (соответствует осциллограмме *4* на рис. 3) и на рис. 8 (соответствует осциллограмме *2* на рис. 3).

В опыте, представленном на рис. 7, наблюдается сильное расхождение расчета с экспериментом на начальной стадии сигнала $0 \div 0.2$ мкс, которое, по-видимому, связано с конечным временем разогрева «горячих точек» на контакте, что не учитывается в предположении о постоянстве I_c^0. К увеличению времени разогрева могут приводить, в первую очередь, механизмы, связанные с вязкопластическим течением вещества за фронтом УВ. Кроме того, вид кривых показывает, что, несмотря на большую величину относительной яркости контактного источника $I_c^0/I_{sh}^0 = 5$, которая закладывалась в расчет, излучение от контактной границы через ≈ 0.4 мкс от момента входа УВ в образец полностью экранируется ударно-сжатой частью образца. Дальнейший

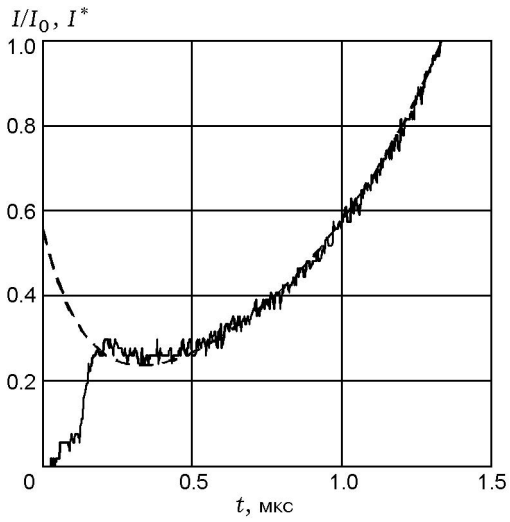

Рис. 7. Зависимость относительного светового потока от времени:

сплошная линия — экспериментальная зависимость $I(t)/I_0$, где I_0 — амплитуда сигнала при $t = 1.34$ мкс; штриховая — расчетная зависимость $I^*(t) = (I_c^* + I_{sh}^*)/I_{sh}^0$, параметры расчета: $I_c^0/I_{sh}^0 = 5$, $\alpha_1 = 2$ мм$^{-1}$, $\alpha_2 = 0.22$ мм$^{-1}$, $l = 10$ мм

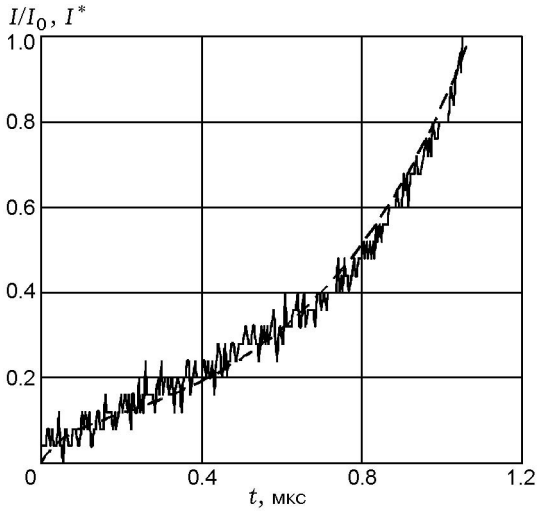

Рис. 8. Зависимость относительного светового потока от времени:

сплошная линия — экспериментальная зависимость $I(t)/I_0$, где I_0 — амплитуда сигнала при $t = 1.07$ мкс; штриховая — расчетная зависимость $I^*(t) = I^*_{sh}/I^0_{sh}$, параметры расчета: $\alpha_1 = 5\,\text{мм}^{-1}$, $\alpha_2 = 0.33\,\text{мм}^{-1}$, $l = 8$ мм

рост сигнала обусловлен в основном уменьшением поглощения светового потока I^0_{sh} в ненагруженной части образца по мере движения по нему УВ. Для опыта, показанного на рис. 8, хорошее соответствие расчета эксперименту достигнуто без учета излучения с контактной поверхности, т. е. при $I^0_c = 0$.

Для опытов, осциллограммы *3*, *5* которых показаны на рис. 3, не удалось достигнуть удовлетворительного соответствия расчета с осциллограммами в течение первых 0.5 мкс, что, по-видимому, связано с разбросом данных из-за неконтролируемого качества контактной поверхности и приближениями модели. Однако описание профиля на конечной стадии сигнала не зависит от предположений об излучении на контакте, поскольку на этой стадии достаточно сильна экранировка слоем ударно-сжатой части образца. На последней стадии профиль сигнала малочувствителен также и к предположению о зависимости излучательной способности слоя от его толщины, поскольку $\varepsilon_{sh} \cong 1$ и фронт рассматривается как абсолютно черное тело.

Ошибки в определении α_1 и α_2 оценивались варьированием этих параметров при подгонке расчета к экспериментальным кривым при условии 10%-го отклонения. Это позволило оценить ошибку в определении α_1 в 50 %, а в определении α_2 — в 10 %. Однако разница в определении α_2 между опытами, показанными на рис. 7 и 8, составила 40 %. Последнее, по-видимому, связано с разбросом характеристик образцов, поскольку специальных мер по их отбору не предпринималось.

Остается непонятным механизм развития впереди фронта УВ зоны, в которой развивается фотопроводимость, поскольку из-за высокого значения α_1 световой поток из зоны контакта должен сильно поглощаться в ударно-сжатом фторопласте. В связи с этим можно предположить два механизма развития фотопроводимости в образце. Световой поток из зоны контакта создает активные центры фотоионизации во всем образце, которые затем развиваются за счет объемного излучения из зоны фронта. Можно также предположить, что коэффициент α_1 сильно зависит от спектрального состава излучения и имеет малое значение в ультрафиолетовом диапазоне. Выяснение этого вопроса требует проведения дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Обнаружено, что ударно-индуцированное световое излучение из ПТФЭ имеет сильно различающиеся временны́е и амплитудные характеристики в зависимости от качества контактной поверхности между образцом и пластиной, подводящей ударную волну. В экспериментах регистрируется суммарное излучение из зоны контактной границы и из зоны, примыкающей к фронту УВ, поэтому в зависимости от качества границы основной вклад в сигнал дает тот или иной механизм. В результате анализа опытов с контактным зазором, «заполненным воздухом», высказано предположение о возникновении впереди фронта УВ волны фотопроводимости, индуцированной светом. Эта зона вместе с зоной ударно-сжатого вещества может экранировать световое излучение из зоны контакта.

Заполнение контакта иммерсионным маслом позволяет существенно уменьшить вклад контактных источников и выделить в качестве основного вклад светящейся зоны за фронтом УВ. В этом случае применение методики расчета [18] с некоторыми упрощающими предположениями об излучательной способности плоского слоя ударно-сжатого фторопласта и о постоянстве коэффициентов поглощения в веществе перед фронтом и за фронтом УВ позволяет

получить удовлетворительное согласие расчета с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кормер С. Б., Синицин М. В., Кириллов Г. А., Урлин И. Д.** Экспериментальное определение температур ударно-сжатых NaCl и KCl и их кривых плавления до давления 700 кбар // Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах / Под ред. Р. Ф. Трунина. Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1992. С. 155–168.
2. **Воскобойников И. М., Апин А. Я.** Измерение температуры детонационного фронта взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1960. Т. 130, № 4. С. 804.
3. **Sheng-Nian Luo, Akins J. A., Arens T. J., Asimow P. D.** Shock compressed $MgSiO_3$ glass, enstatite, olivine and quartz: Optical emission, temperatures, and melting // J. Geophys. Res. B. 2004. V. 109, N 5. B05206.
4. **Гогуля М. Ф., Бражников М. А.** Сравнительные характеристики люминесцентного излучения кристаллических и поликристаллических образцов NaCl // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 4. С. 37–39.
5. **Бражников М. А., Гогуля М. Ф.** Некоторые аспекты ударно-индуцированного излучения прозрачных сред // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 122–131.
6. **Brannon P. J., Morris R. W., Konrad C. H., Asay J. S.** Shock-induced luminescence from X-cut quartz and Z-cut lithium niobate // Proc. SCCM Conf. — 1983 / J. S. Asay, R. A. Graham, G. K. Straub (Eds). North-Holland, 1984. P. 303–306.
7. **Proud W. G., Bourne N. K., Field J. E.** Shock-induced luminescence in polymethylmethacrylate // Proc. SCCM Conf. — 1997 / S. C. Schmidt, D. P. Dandekar, J. W. Forbes (Eds). New York: AIP Press, 1998. P. 801–804.
8. **Gallagher K. G., Yang W., Arens T. J.** Free-surface light emission from shocked Teflon // High-pressure Science and Technology — 1993: Proc. SCCM Conf. / S. C. Schmidt J. W. Shaner, G. A. Samara, M. Ross (Eds). New York: AIP Press, 1993. P. 1551–1553.
9. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Караханова В. Н.** Временные характеристики ударно-индуцированного излучения фторопласта // Труды междунар. конф. «VII Харитоновские научные чтения». Саров, 2005.
10. **Urtiew P. A., Grover R.** Temperature deposition caused by shock interactions with material interfaces // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 140–145.
11. **Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S., Korotkov A. I.** Two-phase viscoplastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives // Proc. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation, June 16–19 1981, Nav. Surf. Weap. Center, White Oak, Mariland. P. 435–447.
12. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др.** О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
13. **Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Яковлев И. Я.** Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.
14. **Grover R., Urtiew P. A.** Thermal relaxation at interfaces following shock compression // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 146–152.
15. **Глазков С. Ю., Глазкова Л. В., Семенова З. И.** Установка для определения коэффициента температуропроводности фторуглеродов // Автометрия. 2000. № 2. С. 104–109.
16. **Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G.** The equation of state of polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. V. 80, N 10. P. 5203–5218.
17. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М.** Электросопротивление политетрафторэтилена при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 6. С. 127–133.
18. **Boslough M. B.** A model for time dependence in shock-induced thermal radiation of light // J. Appl. Phys. 1985. V. 58, N 11. P. 3394–3399.
19. **McQueen R. G., Marsh S. P., Taylor J. W., et al.** The equation of state of solids from shock wave studies // High-Velocity Impact Phenomena / R. Kinslow (Ed.). New-York: Academic Press, 1970.
20. **Якушев В. В.** Электрические измерения в динамическом эксперименте // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 2. С. 3–19.
21. **Coffey H. T., Nanevicz J. E.** Photoconductivity of high voltage space insulating materials: Measurements with metal electrodes // Interim Techn. Rep. 1 Jul. 1974–1 Apr. 1975, Stanford Research Inst., Menlo Park, CA.
22. **Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф.** Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах / Под ред. Р. Ф. Трунина. Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1991. С. 27–35.

Поступила в редакцию 7/XI 2006 г.,
в окончательном варианте — 10/IV 2007 г.