

На правах рукописи



Григорьев Александр Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ
КАК ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском НИИ технической физики им. Е.И. Забабахина и в Институте физики высоких технологий ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Седой Валентин Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Лернер Марат Израилевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Буркин Виктор Владимирович

Ведущая организация: Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится 26 октября 2011 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Адрес: 634050, г.Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан ____ сентября 2011 г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.10
по защите докторских и кандидатских
диссертаций, д.т.н, профессор



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие авиационно-космической и военной техники, энергетики и других отраслей промышленности вызывает необходимость детального экспериментального изучения реакции различных конструкционных материалов на ударно-волновые воздействия. Одним из способов, позволяющих реализовать ударное воздействие на материалы, является электрический взрыв проводников (ЭВП).

Явление ЭВП представляет значительный интерес для исследований физики конденсированного состояния, физики плазмы, высокотемпературной теплофизики, высоковольтной электротехники и смежных областей науки. Эти работы важны, с одной стороны, для понимания сложной и многофакторной физической природы явления; с другой стороны – важность исследовательских работ связана с обширной областью практического применения ЭВП в научных исследованиях, технике и различных технологиях. Среди электровзрывных технологий, получивших практическое применение, можно выделить: получение импульсных давлений, нанесение тонких пленок, получение наноразмерных порошков различного фазового и химического составов и др. Поэтому изучение протекающих при ЭВП процессов и установление неизвестных закономерностей данного явления необходимы как с научной, так и с практической точек зрения.

Нахождение металла в конденсированном состоянии на протяжении практически всего этапа ввода энергии и малое время нагрева ($\sim 10^{-6}$ с) обуславливают отсутствие полной релаксации структуры взрывающегося металлического проводника. Как следствие, это приводит к увеличению энтальпии плавления и взрыву проводника при высоких введенных энергиях (порядка и более энергии сублимации металла w_c). Наличие вокруг проводника конденсированной или газообразной среды, препятствующей свободному расширению металла, позволяет создавать в этой среде ударную волну. Наиболее важными факторами, влияющими на характеристики ЭВП, являются электрофизические характеристики металла проводника, плотность введенной в проводник энергии, скорость нагрева или плотность тока, плотность и акустическая жесткость среды, окружающей проводник.

Ударно-волновые процессы при электрическом взрыве проволок и фольг в разное время исследовали Ю.А. Котов, А.П. Байков, Е.В. Кривицкий, Н.Н. Столович, W.M. Lee, M. Oуane, В.В. Буркин, В.В. Лопатин, А.В. Павленко, Я.Е. Красик с соавт. и др. В исследованиях было показано, что существует некоторое оптимальное соотношение сечения взрывающегося проводника и энергии конденсаторной батареи, позволяющее получить максимальное давление в ударной волне. W.M. Lee и R.D. Ford нашли, что легирование металла может приводить к изменению амплитуды давления, и показали существование линейной корреляции между амплитудами импульсов давления и импульсов индуктивного напряжения, а В.М. Кульгавчук обнаружил влияние насыщения исходного металла водородом: при ЭВП происходит увеличение амплитуды и уменьшение времени нарастания импульса напряжения. Ю.А. Котов показал, что скорость ударной волны определяется объемной плотностью введенной энергии и длиной проводника. По дан-

ным Я.Е. Красика с соавторами амплитуда ударной волны зависит от максимального значения скорости нарастания мощности на единицу длины проводника.

Использованием электрического взрыва фольги (ЭВФ) для моделирования механического воздействия ударной волны на конструкционные узлы и материалы занимались в РФЯЦ-ВНИИТФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также в 12 ЦНИИ Министерства Обороны. Во ВНИИТФ данные исследования проводили Р.А. Мангасаров, А.Т. Литвин, В.Н. Афанасьев, Ю.А. Кучеренко, А.В. Павленко и др. Возможность использования кварцевых датчиков давления для исследования амплитудно-временного профиля импульса давления, возникающего в твердом теле при ЭВП, была показана во ВНИИТФ В.Н. Афанасьевым.

Однако в перечисленных выше работах целенаправленные систематические исследования различных факторов, способных оказать влияние на генерацию импульсного давления при ЭВП, не проводились, количественные вопросы зависимости величины давления от указанных факторов, а также от материала и структурного состояния проводника не изучены.

Таким образом, на сегодняшний день отсутствует достаточное количество экспериментальных данных по измерению давления при ЭВП, позволяющих описывать и прогнозировать давление в конденсированной среде. Эти данные важны для инициирования взрывчатых веществ, а также для исследования динамических характеристик материалов и испытания конструктивных узлов. Кроме того, выявление *закономерности генерации импульсного давления при ЭВП* важно для разработки электровзрывных преобразователей электрической энергии контура в энергию ударной волны, а также для оценки возможной величины давления при использовании ЭВП в различных технологиях (получение ультрадисперсных порошков, нанесение тонких пленок и др.) и технике (использование ЭВП как размыкателя), где ударно-волновое воздействие на конструктивные элементы установки является нежелательным.

Цель работы: установление закономерностей генерации импульсного давления при электрическом взрыве проводников, используемого для получения ударно-волновых нагрузок в конденсированных средах.

Основные задачи исследований:

1. Определить связь между энергией, введенной во взрываемый проводник, и амплитудой ударной волны, генерируемой в передающей среде; исследовать однородность распределения давления при электрическом взрыве фольги.

2. Оценить коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны.

3. Выработать рекомендации по способам повышения амплитуды давления и увеличения коэффициента преобразования энергии контура в энергию ударной волны.

4. Исследовать влияние структурного состояния металлического проводника на параметры создаваемого при взрыве давления, а также исследовать начальную стадию ЭВП на примере меди и металла, обладающего температурным полиморфизмом – титана.

Методы исследования. Для измерения энергетических характеристик ЭВП использовался осциллографический метод – применялись импульсная осцилло-

графия тока в контуре (пояс Роговского, токовый шунт) и напряжения на взрываемом проводнике (омический делитель напряжения). Регистрация импульса давления осуществлялась кварцевым датчиком давления, работающем в токовом режиме. Также использовались оценочные расчеты.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено, что максимальное давление ударной волны, генерируемой в конденсированных средах при ЭВП, линейно зависит от введенной в проводник удельной энергии w , отнесенной к удельной энергии сублимации металла w_c в диапазоне $w/w_c = (0,4...2,7)$. Эта зависимость соблюдается для всех исследованных металлов (Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W, латунь).

2. Установлено, что давление в центральной области фольги начинает формироваться позднее, чем в периферийной области, и достигает большей величины.

3. На примере титана экспериментально установлено, что за счет насыщения металлического проводника водородом достигается повышение амплитуды давления при ЭВП. Так, насыщение титановой фольги водородом (0,42 масс. %) приводит к росту амплитуды импульса давления на ~ 50 %, что объясняется снижением энергии сублимации при ее насыщении водородом.

Практическую значимость имеют следующие, полученные автором, результаты.

1. Экспериментальная зависимость, связывающая амплитуду генерируемого при ЭВП давления в передающей среде (ПММА, стекло К5, вода) с введенной в проводник энергией, с использованием которой можно оценивать развиваемое при ЭВП давление по измерениям введенной в проводник энергии.

2. Способ увеличения амплитуды давления в передающей среде за счет насыщения титановой фольги водородом.

3. Для экспериментального стенда РФЯЦ–ВНИИТФ ГНУВ-2 параметры разрядного контура приближены к режиму согласованного взрыва, что позволило снизить массогабаритные параметры стенда и повысить его эффективность.

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью и повторяемостью экспериментальных результатов, а также непротиворечивостью опубликованным экспериментальным данным.

Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, постановке и проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов. На основе экспериментальных исследований, проведенных при непосредственном участии автора, получены основные результаты, представленные в диссертации, и сформулированы основные научные положения и выводы. Все работы, опубликованные в соавторстве, выполнены при его личном участии.

На защиту выносятся следующие результаты и положения диссертационной работы:

- При электрическом взрыве фольги (Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W, латунь) зависимость амплитуды давления в передающих средах из полиметилметакрилата и стекла К5 (в центральной области взрывающей фольги) от введенной энергии, в области энергий $w = (0,4...2,7) w_c$, описывается линейным уравнением $P_m = f(w/w_c)$.
- При электрическом взрыве фольги (Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W, латунь) максимальное значение коэффициента преобразования энергии разрядного контура в

энергию ударной волны в ПММА и стекле К5 на расстоянии от фольги 3...10 мм в области введенных в фольгу энергий $w \leq 2 w_c$ не может превышать 25 %.

- Способ повышения амплитуды давления в передающей среде при ЭВП за счет насыщения титановой фольги водородом.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации опубликованы в 19 печатных работах, из них 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, подана 1 заявка на патент РФ. Материалы диссертационной работы докладывались на X Международной научной конференции «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2010 г.), Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе» (Томск, 2009 г.), X и XIII Международной научно-практической конференции Современные техника и технологии (Томск, 2004 и 2007 гг.), VIII Международном симпозиуме KORUS (Томск, 2004 г.), 20th International Conference on Heat Treatment (Czechia, Jihlava, 2004 г.), VII Всероссийской конференции "Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем" (Ершово, Московская обл., 2005 г.), International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems SCCS–2005 (Москва, 2005 г.), II International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials (Томск, 2006 г.).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы: всего 156 страниц, включая 73 рисунка, 10 таблиц, 3 приложения и список литературы (175 наименований).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе дано феноменологическое описание и приведена классификация видов ЭВП, рассмотрены существующие модели разрушения проводника и определена область проведения исследований. Приведены краткие результаты обзора литературы, выполненного автором, с целью выявления факторов, влияющих и способных оказать влияние на генерацию импульсного давления при ЭВП. Исходя из известных литературных данных о состоянии металла, выделены неравновесные состояния, которыми сопровождается импульсный электронагрев металла, и предложены экспериментальные условия для наблюдения релаксационного эффекта. Выделено влияние микроструктурного состояния металла на его физические свойства и на генерируемый при ЭВП импульс электрического напряжения.

Анализ имеющейся литературы показал, что уровень и скорость нагрева являются значимыми факторами, которые определяют такие сопровождающие ЭВП процессы, как генерация импульсов давления и электрического напряжения, диспергирование проводника в ультрадисперсный порошок. Показано, что применительно к задаче получения импульсного давления при ЭВП, существенное влияние на амплитуду давления может быть оказано исходным структурным и микроструктурным состоянием металла.

Из результатов проведенного обзора следовало, что запасаемая энергия практически всех существующих установок для получения ударных волн электро-

взрывом фольги многократно превышает энергию сублимации взрываемого металла, что свидетельствует об их неоптимальном (несогласованном) режиме работы. В то же время, для снижения затрат энергии, повышения амплитуды генерируемого давления и коэффициента преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны следует осуществлять ЭВП в согласованном режиме.

В соответствии с результатами проведенного литературного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены элементы разрядного контура при осуществлении ЭВП и методики измерений, использованные при проведении экспериментов.

В исследованиях были использованы следующие измерительные методики: импульсная осциллография тока в контуре (пояс Роговского, токовый шунт) и напряжения на взрываемом проводнике омическим делителем напряжения; микротвердость образцов определялась с помощью микротвердометра ПМТ-3; микроструктура проводника исследовалась методом оптической микроскопии после химического травления образцов; для визуализации образующихся при взрыве страт использовался метод конденсационной регистрограммы; импульс давления регистрировался кварцевым датчиком давления, работающем в токовом режиме с разрешающей способностью около 5 нс. Большинство экспериментов по измерению давления при ЭВП было проведено на металлических неотожженных фольгах. Использование фольги в качестве взрываемого проводника позволило приблизить датчик давления на расстояния от фольги в единицы миллиметров. В качестве диэлектрической подложки, служащей для защиты датчика давления от высокого напряжения, использовались полиметилметакрилат (ПММА) и стекло К5. Использование ПММА для защиты датчика давления от высокого напряжения связано с его технологичностью (с легкостью его обработки) и низкой стоимостью. Поэтому большая часть экспериментов по измерению давления при электрическом взрыве проводников была проведена с использованием ПММА. В экспериментах подложка располагалась как с одной стороны от взрывающей фольги (полусвободный разлет), так и с двух сторон. Временной профиль волны давления в ПММА восстанавливался путем учета экспериментальной зависимости скорости волны давления от ее амплитуды. Погрешность измерения давления составляла 12 %, введенной при взрыве в проводник энергии – 15 %.

Рассмотрены элементы разрядного контура, используемого для реализации ЭВП; основными элементами экспериментального стенда, используемого для ЭВП, являются: емкостной накопитель с замыкающим коммутатором (генератор импульсных токов – ГИТ), блок осциллографической регистрации и электрически взрываемый проводник, служащий нагрузкой ГИТ. В качестве емкостного накопителя использовалась конденсаторная батарея, выполненная на конденсаторах типа ИК. Первые эксперименты во ВНИИТФ по электрическому взрыву проводников проводились на экспериментальном стенде ГНУВ-2 (емкость конденсаторной батареи $C_0 = 79$ мкФ, индуктивность контура $L_c = 40$ нГн, зарядное напряжение $U_0 = 18...44$ кВ). В то же время, для выявления закономерностей генерации импульсного давления при ЭВП необходимо иметь возможность изменять параметры разрядного контура в широком диапазоне. С этой целью автор выполнил

ряд работ, позволивших варьировать электротехнические параметры стенда в следующих пределах: $L_c = 35 \dots 2000$ нГн, $C_0 = 1,4 \dots 79$ мкФ и $U_0 = 18 \dots 48$ кВ.

Для исследования пространственного распределения амплитудно-временного профиля волны давления при электрическом взрыве фольги была проведена градуировка кварцевых датчиков давления малых размеров с использованием легкогазовой пушки и интерферометра VISAR.

Проведенные исследования показали, что потери энергии δ_c в контуре с $L_c < 1$ мкГн (режим взрыва, близкий к согласованному), составляют $\sim (11 \dots 22)$ % от энергии, введенной в медный проводник.

В третьей главе представлены результаты исследования предвзрывных процессов, протекающих в проводнике в твердофазном состоянии на примере титана и меди. Титан был выбран в качестве металла, обладающего температурным полиморфизмом, а медь – как металл, широко применяющийся в качестве взрываемого проводника.

На примере Ti исследовано влияние скорости нагрева на полиморфное $\alpha \rightarrow \beta$ превращение. При $\alpha \rightarrow \beta$ превращении в Ti происходит снижение электросопротивления на 10 %. Данный факт позволяет идентифицировать полиморфный фазовый переход по осциллограмме напряжения и рассчитанной временной зависимости электросопротивления.

На рис. 1 приведены зависимости энтальпии H_{tr} и температуры T_{tr} полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения Ti от скорости нагрева с использованием имеющихся ли-

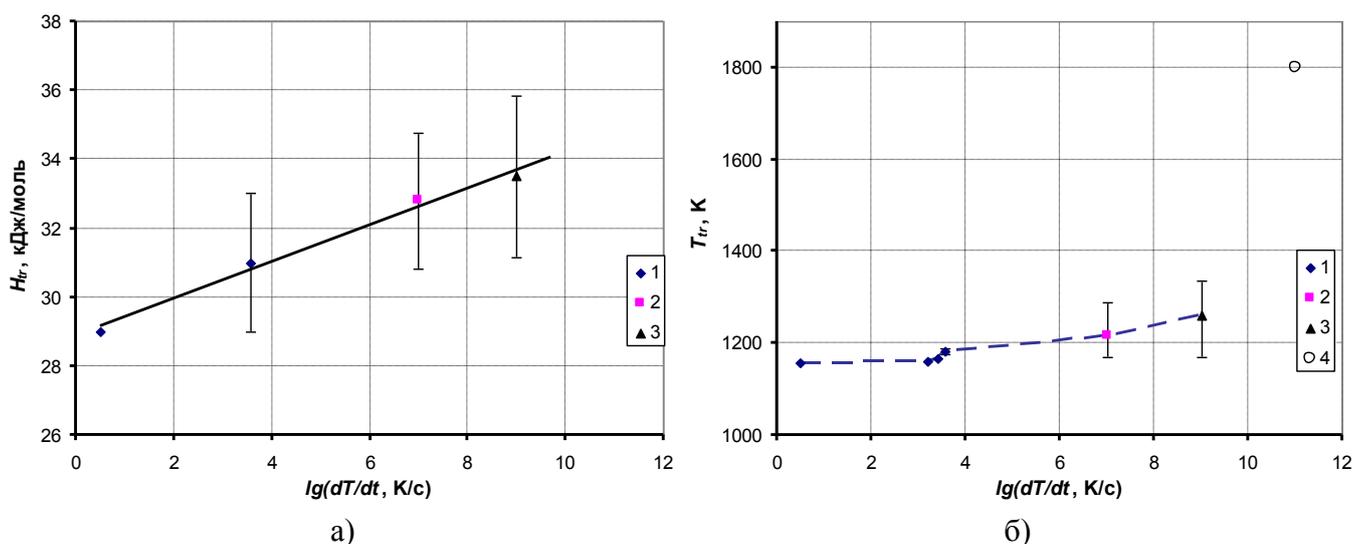


Рис. 1 – Зависимости энтальпии (а) и температуры (б) полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения Ti при импульсном нагреве с различными скоростями: 1 – квазистатический электронагрев¹; 2 – импульсный электронагрев²; 3 – импульсный электронагрев (данные автора); 4 – лазерный нагрев³

¹ Kaschnitz E., Reiter P. Enthalpy and temperature of the titanium alpha-beta phase transformation // Int. J. of Thermophysics. – 2002. – V. 23. – № 5. – P. 1339-1345; Etchssahar E., Aufrederic J. P., Debuigne J. Phase transformation of titanium and some titanium alloys. / Titanium: Sci. and Technol. Proc. 4 Int. Conf. 1980. – V. 2. – P. 1543–1554; Maglic K. D., Pavicic. Thermal and electrical properties of titanium between 300 and 1900 K. // Int. J. of Thermophys. – 2001. – V. 22. – № 6. – P. 1833–1841; Cezairlian A., Miller A. P. Thermodynamic study of the alpha-beta phase transformation in titanium by pulse heating method. // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1978. – V. 83. – № 2. – P. 127–132.

² Мартынюк М.М., Цапков В.И. Электросопротивление, энтальпия и фазовые переходы титана, циркония и гафния при импульсном нагреве // Изв. АН СССР: Сер. Металлы. – 1974. – №2. – С. 181-188.

температурных данных. Как видно из рис. 1, при скорости нагрева $dT/dt > 10^7$ К/с (соответствует скорости ввода энергии $dw/dt > 600$ Дж/г·мкс) происходит заметный рост энтальпии и расчетной температуры превращения, превышающий 9 %-ую экспериментальную погрешность. В случае лазерного нагрева Ti пленки со скоростью 10^{11} К/с (точка 4), авторы³ диагностируют полиморфный $\alpha \rightarrow \beta$ переход «накануне плавления, но ниже температуры плавления».

Таким образом, при нахождении металла в твердофазном состоянии в процессе ЭВП, изменения в термодинамическом состоянии металла происходят быстрее, чем подстройка системы атомов к равновесию. Т.е. повышенная введенная в металл энергия, превышающая энергию равновесного фазового перехода, отчасти связана с существующими в металле релаксационными процессами.

Предплавление и плавление Си проводников

Полученные автором экспериментальные результаты свидетельствуют о начале плавления с внешней поверхности (образование дефектной структуры на внешней поверхности образца), что подтверждает данные Байкова (1980). При электронагреве поликристаллических образцов происходит более интенсивное плавление на границах зерен (в объеме поликристаллического проводника). Это связано с более высоким электрическим сопротивлением границ R_{gr} (по сравнению с объемом кристаллита $R_{cr} \sim 0.9 R_{gr}$)⁴ и, соответственно, повышенным энерговыделением на них.

Для случая электрического взрыва фольги исследовалась пространственная неоднородность процесса плавления. На рис. 2 приведена фотография медной фольги с предплавлениями. Режим разряда подбирался таким образом, чтобы не произошло расплавления фольги и она сохранила свою форму.

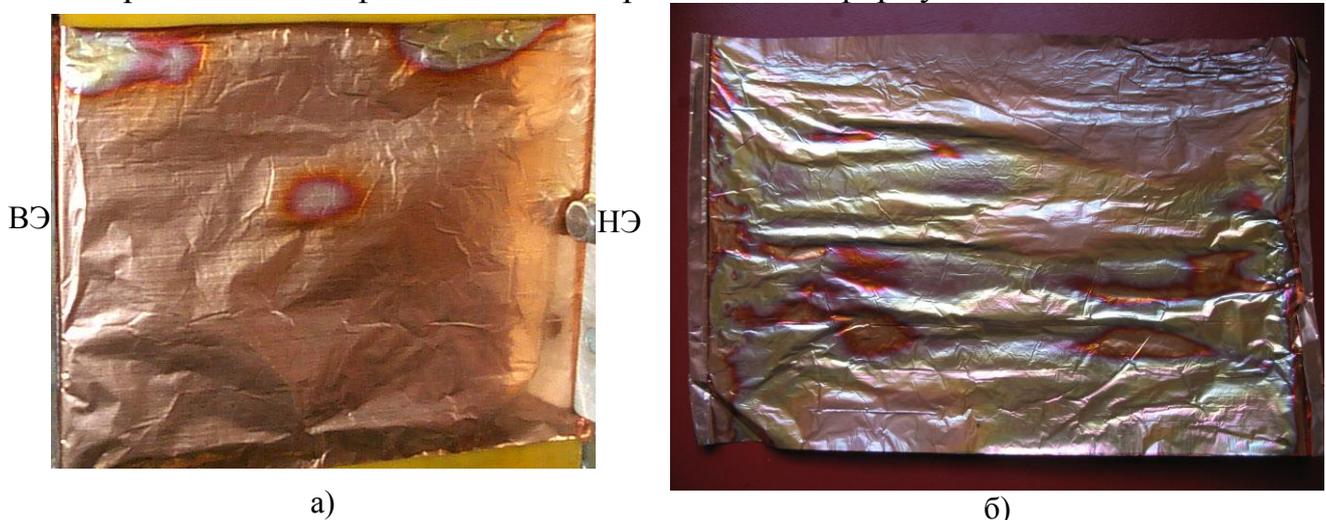


Рис. 2 – Начало стадии плавления (неоднородность нагрева) Си фольги 16 мкм при ЭВП: а) начальная стадия; б) – последующая стадия; время разряда – единицы мкс, плотность тока $j \sim 10^5$ А/см²; ВЭ – высоковольтный электрод, НЭ – низковольтный электрод

Как видно из рис. 2, даже на стадии до плавления наблюдается неоднородность нагрева фольги. Расположение мест начала плавления фольги носит случайный

³ Kleinschmidt H., Ziegler A., et al. Phase transformation analysis in titanium at nanosecond time resolution // J. Appl. Phys. – 2005. – V.98. – P.054313.

⁴ Dezanneau G., Morata A., et al. Grain-boundary resistivity versus grain size distribution in three-dimensional polycrystals // App. Phys. Let.–2006.–V.88.–141920.

характер. Таким образом, наблюдаемая уже на начальной стадии ЭВФ неоднородность плавления фольги, свидетельствует о возможном неоднородном формировании давления по площади фольги на финальной стадии ЭВП. Это подтверждает необходимость экспериментального изучения однородности формирования пространственно-временного профиля давления.

В четвертой главе представлены результаты исследования амплитудно-временных характеристик импульсного давления, формируемого при электрическом взрыве фольг и проволочек.

«Деформация» импульса давления ПММА. Сравнение волн давления в ПММА и стекле

Полиметилметакрилат, в силу его упруго-вязко-пластических свойств, наряду с затуханием волны давления вызывает также изменение ее профиля. Поэтому наряду с регистрацией и восстановлением амплитудного значения волны давления встает вопрос о фронте и спаде импульса давления на входе в ПММА. Для этих целей одним из подходящих материалов является стекло. Искажение формы импульса давления при его прохождении через стекло можно считать малым по сравнению с ПММА.

На рис. 3,а приведены профили давления, зарегистрированные датчиком давления на контактной поверхности со стеклом и с ПММА при одинаковых режимах взрыва (подложка расположена с одной стороны). Сравнение профилей позволяет сделать вывод о сильной деформации формы давления, вносимом упруго-вязко-пластическими свойствами ПММА. Как видно из рис. 3,а, ПММА «сжимает» фронт импульса давления и затягивает его спад.

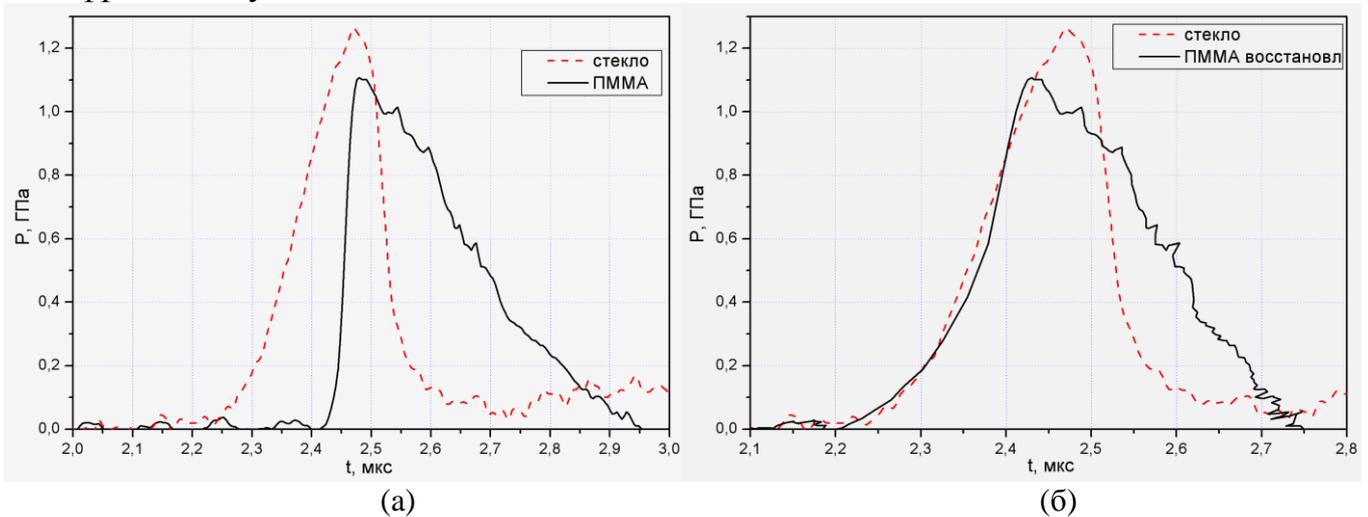


Рис. 3 – Амплитудно-временные профили давления, зарегистрированные датчиком давления на контактной поверхности со стеклом и с ПММА (а) при прочих равных условиях (при одинаковых режимах взрыва); и профиль давления, восстановленный в ПММА с учетом его упруго-вязко-пластических свойств (б)

Для определения профиля волны давления в ПММА вблизи границы «ПММА–фольга» можно применить численный гидродинамический расчет с использованием уравнения состояния ПММА. Автором же для «восстановления» профиля волны давления в ПММА была использована экспериментальная зависимость скорости волны давления в ПММА $D[\text{км/с}] = f(P[\text{ГПа}])$, которая была аппроксимирована полиномом четвертой степени:

$$D(P) = -0,092 P^4 + 0,7669 P^3 - 1,5852 P^2 + 1,4046 P + 2,7. \quad (1)$$

Восстановление профиля волны давления производилось за счет учета (перенормировки) времени, необходимого каждой точке волны (с учетом давления P) для прохождения подложки из ПММА толщиной $d_{\text{ПММА}}$:

$$t_{\text{восст}} = t - d_{\text{ПММА}}/D(P), \quad (2)$$

где t – время в амплитудно-временной зависимости давления, зарегистрированной датчиком давления.

На рис. 3,б представлен восстановленный профиль волны давления в ПММА с учетом зависимости скорости волны от величины давления $D = D(P)$; здесь же приведен профиль волны давления, зарегистрированный в стекле К5. Как видно из приведенных данных, восстановленный фронт волны давления в ПММА хорошо совпадает с фронтом волны давления в стекле. Отличие спада импульсов давления связано с релаксационными упруго-вязко-пластическими процессами в ПММА.

Наличие связи между амплитудами давления и напряжения при электрическом взрыве проволочек⁵ позволяет предположить существование подобной связи и при электрическом взрыве фольги. Но при электрическом взрыве фольги давление распределено неоднородно по площади фольги. Путем восстановления фронта импульса давления в ПММА по формулам (1) и (2) становится возможным анализ связи между длительностями фронтов импульсов давления и напряжения при ЭВФ. На рис. 4 приведена полученная зависимость между длительностью фронта импульса давления $t_{Pф}$ (в центральной области фольги) и длительностью фронта импульса напряжения $t_{Uф}$ при электрическом взрыве медных фольг толщинами 16...50 мкм.

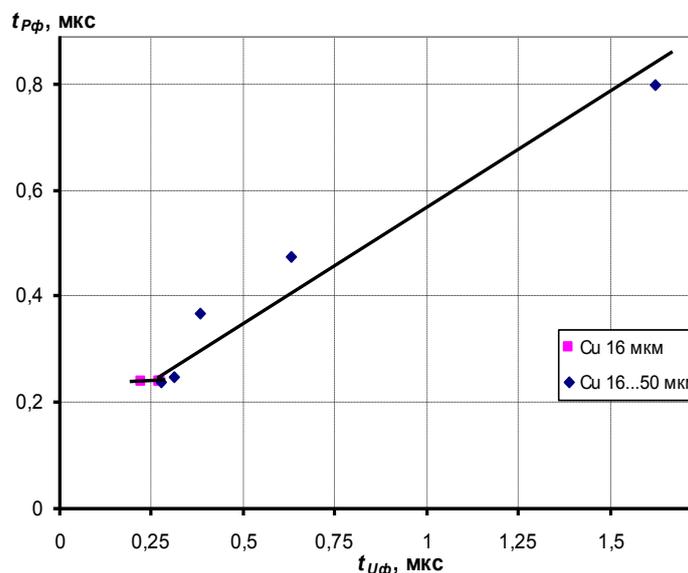


Рис. 4 – Связь длительности фронта импульса давления и длительности фронта импульса напряжения при взрыве медных фольг 16...50 мкм

Неоднородность распределения давления при взрыве фольг

Как и в случае проволочек, при электрическом взрыве фольг наблюдается неоднородность структуры фольги при ее взрыве. На рис. 5 приведена конденсац-

⁵ Lee W.M., Ford R.D. Pressure measurements correlated with electrical explosion of metals in water // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64. – № 8. – P. 3851–3854.

онная регистрограмма, полученная при электрическом взрыве медной фольги толщиной 16 мкм размером 250×180 мм (взрыв с бесконечной паузой тока).



Рис. 5 – Следы страт при взрыве Cu фольги 16 мкм размером 250×180 мм, ВЭ – высоковольтный электрод, НЭ – низковольтный электрод

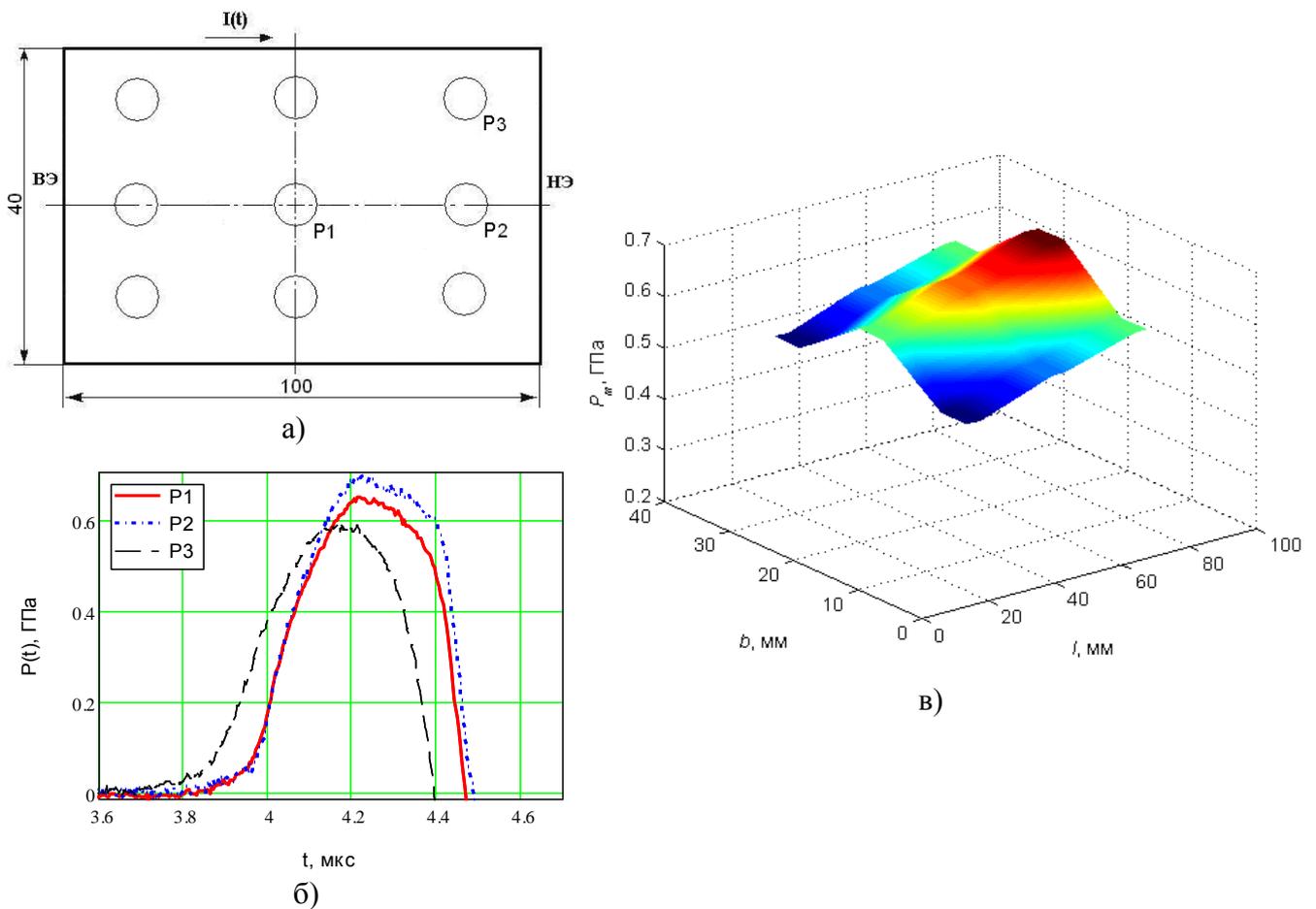


Рис. 6 – Схема расположения датчиков давления на подложке с Ti фольгой 90 мкм размером 100 мм × 40 мм (а), импульсы давления, зарегистрированные датчиками (б), и реконструированное пространственное распределение давления при достижении им своего максимума P_m (в), l – длина фольги, b – ширина фольги; $w \approx 1,35 w_c$

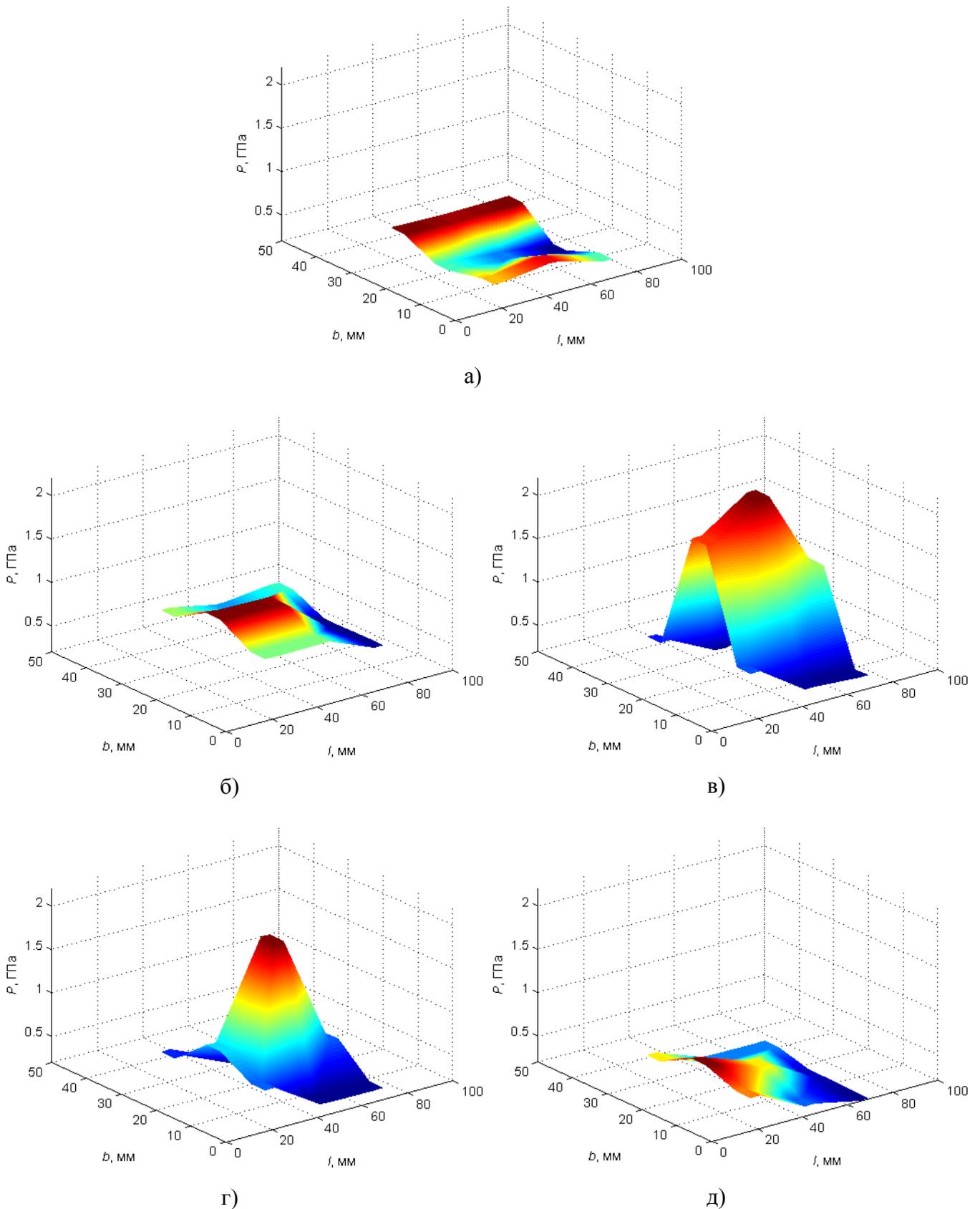


Рис. 7 – Реконструированное пространственное распределение давления P для различных моментов времени при взрыве Cu фольги 16 мкм размером 100 мм \times 50 мм: (а) – 3,5 мкс, (б) – 3,6 мкс, (в) – 3,71 мкс, (г) – 3,74 мкс, (д) – 3,85 мкс; l – длина фольги, b – ширина фольги; $w = 2,3 w_c$. Подложка из стекла K5 расположена с одной стороны

Для исследования пространственного распределения амплитудно-временного профиля волны давления при электрическом взрыве фольги были использованы проградуированные кварцевые датчики давления малых размеров (диаметр [мм] / толщина [мм]) – 10 / 3 и 8 / 2,5. На диэлектрической подложке (стекло, ПММА) размещали несколько датчиков давления таким образом, чтобы провести регистрацию давления и в центральной, и в периферийных областях фольги. Характерная схема размещения датчиков давления приведена на рис. 6,а. Значения в промежуточных областях получали методом линейной интерполяции.

Результаты измерения давления в различных областях при взрыве фольги свидетельствуют о том, что при ЭВФ существует некоторая неоднородность и неодновременность («неплоскостность») генерируемого давления. При взрыве фольги давление в центральной области начинает формироваться позднее, чем в периферийной области, и достигает большей величины (рис. 6). Неоднородность распределения давления при введенной энергии $w \approx 1,35 w_c$ составляет $\sim 17\%$. На рис. 6,а приведена схема расположения датчиков при взрыве титановой фольги толщиной 90 мкм; на рис. 6,б – зарегистрированные датчиками импульсы давления; на рис. 6,в – реконструированное пространственное распределение давления при достижении им своего максимума P_m . При увеличении величины введенной энергии w до $2,3 w_c$ происходит усиление неоднородности энерговыделения, в результате чего неоднородность распределения давления достигает $\sim 100\%$ (рис. 7).

В случае протекания тока параллельно направлению прокатки фольги при ЭВФ происходит увеличение амплитуд импульсов напряжения и давления, при этом импульс тока изменяется слабо (рис. 8). Это свидетельствует о существенном влиянии начального (локально-неоднородного) сопротивления проводника на характеристики ЭВП – происходит увеличение введенной энергии и рост амплитуды давления.

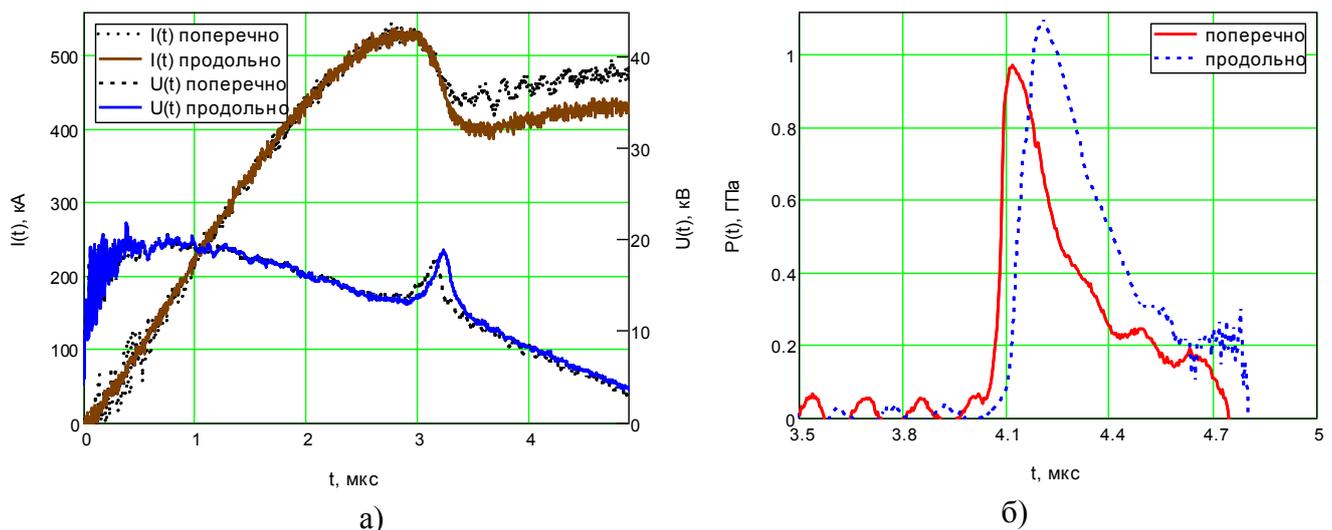


Рис.8 – Амплитудно-временные зависимости тока и напряжения (а) и давления (б) при поперечном ($w \approx 1,32 w_c$) и продольном ($w \approx 1,4 w_c$) расположении 16 мкм Cu фольги размером 100 мм × 100 мм

Введенная энергия и импульс давления при взрыве различных металлов

В большинстве случаев парообразное состояние металлов описывается кинетической теорией газов с достаточной точностью. Это позволяет рассмотреть по-

ведение сильно нагретого металла (введенная в металл энергия w порядка энергии сублимации металла w_c), используя уравнения состояния идеального газа. Тогда давление в функции внутренней энергии e_{int} и энтальпии h (для случая постоянных удельных теплоемкостей) можно записать

$$p = e_{\text{int}} \rho_m (\gamma - 1) = h \rho_m (\gamma - 1) / \gamma, \quad (3)$$

где h – энтальпия; ρ_m – плотность [кг/м³]; $\gamma = C_p / C_v$ – коэффициент политропы.

Учитывая зависимость давления от внутренней энергии и энтальпии (3), а также имеющиеся литературные данные по экспериментальным исследованиям ударных волн при ЭВП, автором было сделано предположение, что общей и универсальной для разных металлов является зависимость амплитуды импульса давления P_m от величины относительной введенной энергии w/w_c :

$$P_m = f(w/w_c),$$

где $w = E/m_f$ – удельная энергия, введенная в фольгу к моменту времени, соответствующему полувывсоте спада импульса напряжения, или, в случае отсутствия спада, – к моменту максимума давления; E – энергия, введенная в фольгу; m_f – масса взрываваемой фольги; w_c – энергия сублимации металла на единицу массы.

На рис.9,а приведена полученная автором экспериментально зависимость амплитуды давления в кварцевом датчике (передающая среда ПММА) от относительной введенной в фольгу энергии $P_m = f(w/w_c)$ для различных металлов, зарядных напряжений U_o , индуктивностей контура L_c , емкостей конденсаторной батареи C_0 , толщин и размеров фольг, направлений прокатки фольги относительно протекающего тока. Восстановленные зависимости амплитуды волны давления в ПММА и стекле К5 с учетом коэффициента преломления волны кварцевым датчиком давления от относительной введенной в фольгу энергии w/w_c приведены на рис. 9,б. На рис. 9 обобщены результаты экспериментов, когда подложка находилась как с одной стороны от взрываваемой фольги, так и когда фольга была поджата подложками с двух сторон; также приведены результаты различных экспериментов при взрыве проволочек в воде. Зависимости при ЭВФ получены для фольг с разными толщинами и размерами; варьировались также параметры разрядного контура – $L_c = 35 \dots 2000$ нГн, $C_0 = 1,4 \dots 79$ мкФ и $U_o = 18 \dots 48$ кВ.

Как видно из рис. 9, при электрическом взрыве фольги в области введенных энергий $w = (0,4 \dots 2,7) w_c$, зависимость амплитуды давления (в центральной области взрываваемой фольги) от относительной введенной энергии описывается линейным уравнением. Для передающей среды из ПММА это уравнение имеет вид:

$$P_m \text{ (ГПа)} = (1,06 \pm 0,05) w/w_c - (0,52 \pm 0,08); \quad (4)$$

для передающей среды из стекла К5:

$$P_m \text{ (ГПа)} = (0,951 \pm 0,096) w/w_c - (0,008 \pm 0,176). \quad (5)$$

Менее крутой наклон аппроксимирующей прямой для ПММА по сравнению с аппроксимирующей прямой для стекла К5 (рис. 9, б) связан с сильной нелинейной зависимостью коэффициента затухания волны давления в ПММА от ее амплитуды и частоты. Также более сильный наклон для ПММА может быть обусловлен существенным отличием модулей сжатия ПММА и стекла.

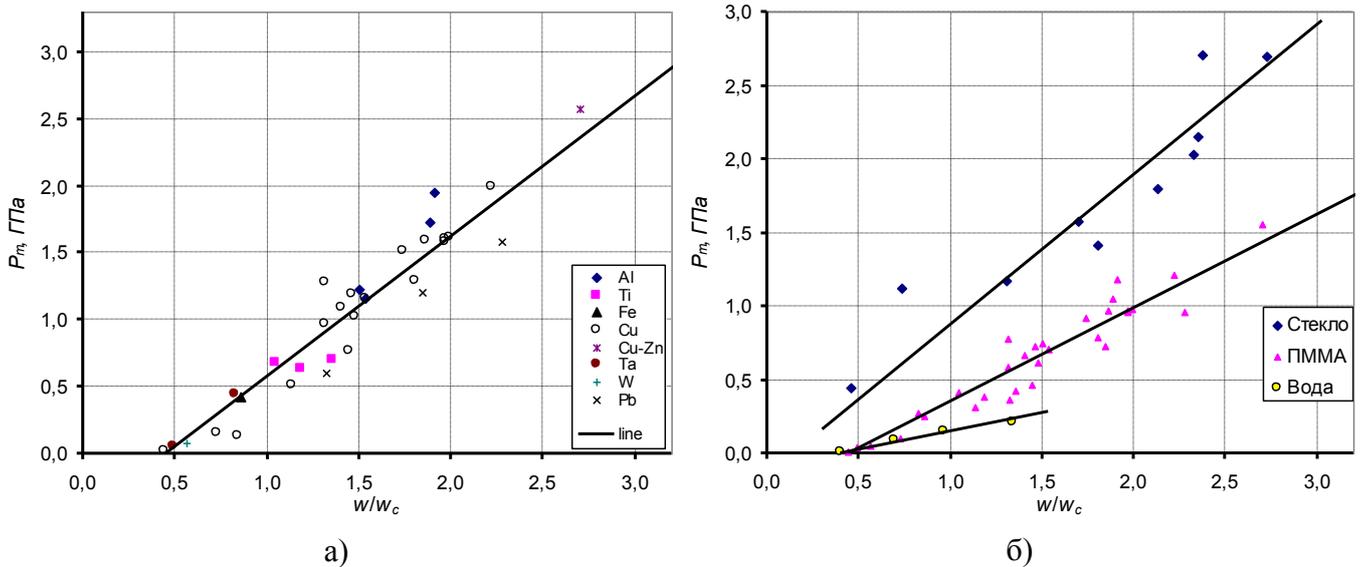


Рис. 9 – Зависимости амплитуды давления от относительной введенной энергии $P_m = f(w/w_c)$: давление в кварцевом датчике (передающая среда ПММА) при взрыве фольги (а) и давление в ПММА (3 мм) и стекле К5 (10 мм) при взрыве фольги, а также при взрыве проволоочки в воде (3 мм) (б)

Введенная в проводник энергия описывается с точностью $\pm 20\%$ уравнением⁶:

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{h_B}{h_0} \right)^{0,5},$$

где W – энергия, введенная в проводник; W_0 – энергия, запасенная в конденсаторной батарее; h_B – интеграл удельного действия тока, требуемый для взрыва данного металла; $h_0 = C_0 U_0^2 / z s^2$ – потенциальное действие контура; $z = (L_c / C_0)^{0,5}$; s – сечение проводника.

Использование критерия подобия h_B/h_0 позволяет оценивать введенную в проводник энергию и прогнозировать развиваемое при ЭВП давление без проведения эксперимента в режиме согласованного взрыва, когда $h_B/h_0 = 1$ и коэффициент использования энергии контура максимален.

Оценка энергии ударной волны. Коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны

Энергия волны давления в приближении плоской звуковой волны есть

$$E_{SW} = \int_V dV \frac{P^2}{\rho_0 \cdot c_0^2},$$

где ρ_0 , c_0 – плотность и скорость звука в невозмущенном материале.

Считая элемент объема как $dV = 2 b l dr$ (b – ширина фольги, l – длина фольги), а расстояние, пройденное волной – $dr = c_0 dt$, окончательно получим

$$E_{SW} = \frac{2 \cdot b \cdot l}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \int_{t_0}^{t_1} P(t)^2 dt. \quad (6)$$

Коэффициент 2 в формуле (6) применяется в случае, когда фольга поджата подложками с двух сторон. В случае, когда подложка расположена только с одной

⁶ Седой В.С. Исследование электрического взрыва проводников и его применение в электрофизических установках. Дисс... д.т.н. Томск, 2004. – 235 с.

стороны от фольги, вместо 2 используется коэффициент 1 (энергией, затрачиваемой на создание ударной волны в воздухе, пренебрегаем). Обобщенные данные по коэффициенту преобразования тепловой энергии, введенной в фольгу, в энергию ударной волны (на основе численного расчета по формуле (6)) приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, среди фольг, поджатых подложками из ПММА, наиболее высокие значения коэффициента преобразования энергии η_{SW} дал Pb, что связано с высоким значением плотности металла, что согласно (3) приводит к более высокому значению давления.

Также эффективным способом повышения η_{SW} является ограничение расширения фольги за счет использования двух подложек. В случае отсутствия второй подложки, η_{SW} снижается в ~ 5 раз, так для Pb $\eta_{SW} \approx 4,4$ %. Столь сильное снижение η_{SW} связано, с одной стороны, с пренебрежением энергией ударной волны в воздухе (контактирующего с противоположной поверхностью фольги), и тем самым исключением из формулы (6) коэффициента "2". С другой стороны, при отсутствии второй подложки, подпирающей фольгу, фольга полусвободно расширяется и есть разгрузка по давлению, в результате чего раньше развивается шунтирующий фольгу разряд и в нее вводится меньше энергии, что также приводит к снижению η_{SW} .

Табл. 1 – Коэффициент преобразования тепловой энергии, введенной в проводник, в энергию ударной волны η_{SW} (для различных проводников)

Металл	w/w_c	Подложка	$\eta_{SW}, \%$
Cu 16 мкм	2,2	ПММА–ПММА (фольга поджата подложками с двух сторон)	16,4
Cu 16...50 мкм, Al 100 мкм	1,3...1,7	ПММА (стекло К5) – воздух	0,7...3,11
Al 14 мкм	1,7...2,35	стекло К5 – стекло К5 (фольга поджата подложками с двух сторон)	20...26
Al 100 мкм	0,7...2,4	стекло К5 – стекло К5 (фольга поджата подложками с двух сторон)	8...19
Pb 50 мкм	2,27	ПММА – воздух	4,4
Pb 50 мкм	3,48	ПММА – ПММА (фольга поджата подложками с двух сторон)	20,5

На рис. 10 приведена зависимость коэффициента преобразования введенной в фольгу энергии в энергию ударной волны η_{SW} от введенной в фольгу относительной энергии w/w_c для различных металлов, толщин и размеров фольги. Как видно из рис. 10 и табл. 1, наибольшее значение η_{SW} при одинаковой относительной введенной энергии w/w_c имеет место, когда фольга поджата подложками с двух сторон.

Таким образом, максимальный коэффициент преобразования энергии η_{SW} при ЭВП сравним с аналогичным коэффициентом при критическом электрическом разряде в жидкости⁷. Однако в области более высоких относительных введенных

⁷ В работе [Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. СПб.: Наука, 2000] на основе обобщения многочисленных результатов, утверждается, что при электрических разрядах в жидкости максимальный коэффициент преобразования энергии наблюдается при критических разрядах и достигает (20...30) %.

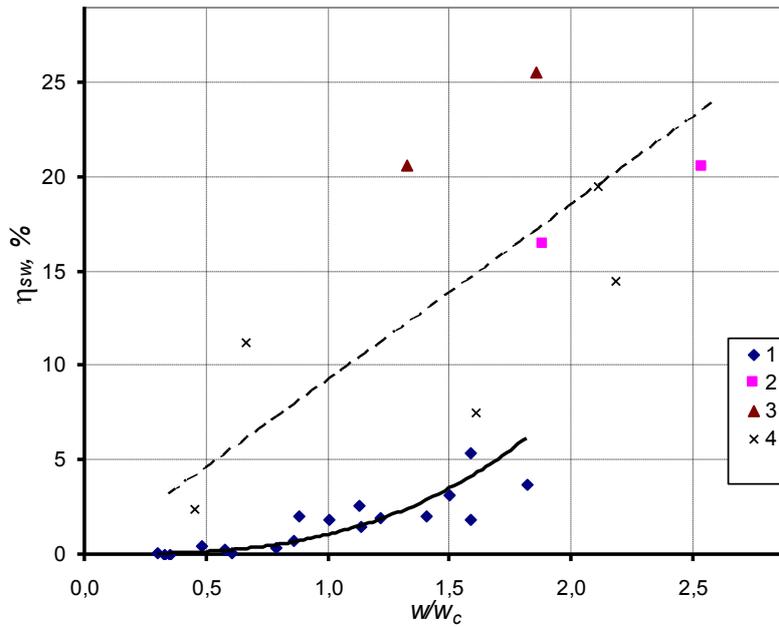


Рис. 10 – Зависимость коэффициента преобразования введенной в фольгу энергии в энергию ударной волны η_{SW} от введенной в фольгу энергии w/w_c для различных металлов, толщин и размеров фольги: 1 – подложка (ПММА, стекло К5) расположена с одной стороны от взрывающейся фольги (Al, Ti, Fe, Cu, Cu-Zn, Ta, W, Pb); 2, 3, 4 – подложки расположены с двух сторон от взрывающейся фольги: 2 – ПММА, фольги: Cu и Pb; 3 – стекло К5, Al фольга 14 мкм; 4 – стекло К5, Al фольга 100 мкм

энергий ($w/w_c > 2,7$) максимальный коэффициент преобразования η_{SW} при ЭВП может заметно превысить η_{SW} при электрическом разряде в жидкости.

Общий коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны (подложка – ПММА толщиной 3 мм) может быть определен как произведение электрического КПД контура ($\eta_c = 1 - \delta_c$) и коэффициента преобразования введенной в фольгу энергии в энергию ударной волны η_{SW} . Принимая $\eta_c = 1 - 0,15 = 0,85$, а $\eta_{SW} = 0,16$, определим средний коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны

$$\eta_{el.SW} = \eta_c \cdot \eta_{SW} = 0,85 \cdot 0,16 = 0,14.$$

Коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны при взрыве фольги (для 14 мкм Al фольги, поджатой с двух сторон подложками из стекла К5 толщиной 10 мм) при $w \approx 2,35 w_c$: $\eta_{SW.max} = 0,255$; $\eta_{c.max}$ принимаем равным 0,9)

$$\eta_{el.SW.max} = \eta_{c.max} \cdot \eta_{SW.max} \cong 0,90 \cdot 0,255 \cong 0,23.$$

Повышение амплитуды давления насыщением металла водородом

Основываясь на том факте, что по мере насыщения исходного металла водородом при ЭВП происходит увеличение амплитуды и уменьшение времени нарастания импульса напряжения⁸, а также, что легирование металла может приводить к изменению амплитуды давления⁵, автором было выдвинуто предположение, что насыщение металла водородом может также привести и к увеличению амплитуды

⁸ Кульгавчук В.М. Изучение кинетики нагрева системы Pd-H импульсным методом // ЖФХ. – 1962. – Т. 36. – № 8. – С. 1713–1716.

генерируемого давления. Проведенные автором эксперименты подтвердили данное предположение. На рис. 11, *а-б* приведены амплитудно-временные профили тока $I(t)$, напряжения $U(t)$ и давления $P(t)$, зарегистрированные при взрыве обычной (Ti) и насыщенной водородом (Ti-H (0,42 масс. %)) титановых фольг (энергия, введенная в Ti-H фольгу до ее взрыва меньше энергии, введенной в Ti фольгу). Как видно из рис. 11, при взрыве титановой фольги, насыщенной водородом происходит увеличение амплитуды давления на $\sim 50\%$, что объясняется снижением энергии сублимации металла при его насыщении водородом. В результате в металл вводится большая относительная энергия w/w_c . Данный результат также подтверждает существование зависимости $P = f(w/w_c)$.

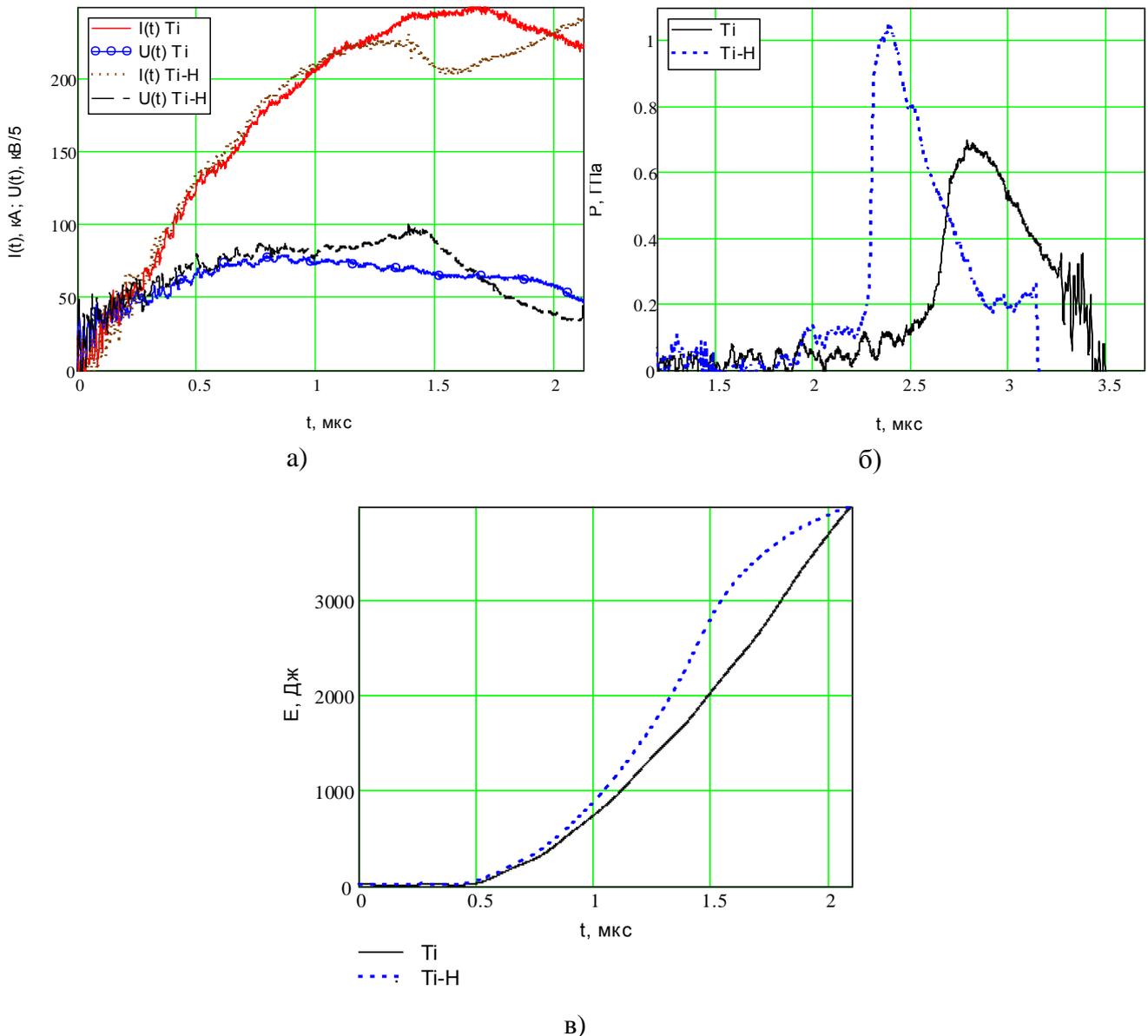


Рис.11 – Амплитудно-временные зависимости тока в контуре $I(t)$, напряжения на взрывае-мой фольге $U(t)$ (а), давления (б) и введенной в фольгу энергии (в) при взрыве обычной и насыщенной водородом 90 мкм титановых фольг размером 45 мм \times 20 мм. Насыщение водородом 0,42 масс. %

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют, что общей для различных металлов при условиях проведенных экспериментов является зависимость амплитуды волны давления P_m от относительной введенной энергии w/w_c . Для разных металлов при различных параметрах контура в диапазоне введенной энергии $w = (0,4 \dots 2,7) w_c$ давление в ПММА хорошо аппроксимируется линейной зависимостью P_m (ГПа) = $(1,06 \pm 0,05) w/w_c - (0,52 \pm 0,08)$; а давление в стекле К5 – P_m (ГПа) = $(0,951 \pm 0,096) w/w_c - (0,008 \pm 0,176)$.

2. Использование критерия подобия h_b/h_0 (отношение интеграла действия к потенциальному действию контура) дает возможность прогнозировать развиваемое при ЭВП давление без проведения эксперимента в режиме согласованного взрыва, когда $h_b/h_0 = 1$ и коэффициент использования энергии контура максимален.

3. Перспективным способом увеличения амплитуды давления при ЭВП является насыщение металлического проводника водородом. Так, экспериментально показано что, насыщение титановой фольги водородом (0,42 масс. %) приводит к росту амплитуды импульса давления на ~ 50 %, что связано со снижением энергии сублимации при насыщении металла водородом. В дальнейшем целесообразно продолжить исследования по возможности получения предельных импульсов давления при насыщении металла водородом.

4. При ЭВП в металле, когда он находится в конденсированном состоянии, имеют место структурно-обусловленные релаксационные процессы, зависящие от скорости нагрева. При электрическом взрыве Ti, начиная со скорости нагрева $dw/dt > 600$ Дж/г·мкс, происходит заметное увеличение энтальпии полиморфного превращения.

5. Найденная для ПММА зависимость скорости волны давления от ее амплитуды $D = f(P_m)$ позволила провести математическую обработку сигналов, зарегистрированных датчиком давления, и восстановить профиль (фронт) волны давления вблизи границы «фольга–ПММА».

6. Результаты измерений давления в различных областях взрывающейся фольги свидетельствуют о наличии локальных неоднородностей энерговыделения, что обуславливает неоднородность и неодновременность («неплоскостность») генерируемого давления. При взрыве фольги, давление в центральной области начинает формироваться позднее, чем в периферийной области, и достигает большей величины. Неоднородность распределения давления при введенной энергии $w \approx 1,35 w_c$ составляет ~ 17 %.

7. При электрическом взрыве фольг, также как и при электрическом взрыве проволочек, существует связь между амплитудами импульсов давления P_m и напряжения U_m . Связь, близкая к линейной, также наблюдается между длительностями фронтов напряжения $t_{U\phi}$ и давления в центральной области фольги $t_{P\phi}$ при ЭВФ.

8. Одним из эффективных способов повышения коэффициента преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны является увеличение относительной энергии w/w_c , введенной в проводник.

9. При электрическом взрыве фольги (Cu, Al, Fe, Ta, Ti, Pb, W, латунь) максимальный коэффициент преобразования электрической энергии контура в энергию ударной волны в ПММА (расстояние 3 мм от взрывающейся фольги) и стекле К5

(расстояние 10 мм от взрываемой фольги) в области введенных энергий $w = (0,4...2,7) w_c$ составляет 25 %.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Григорьев А.Н., Павленко А.В. Влияние абсорбированного водорода на импульс давления при электрическом взрыве титановой фольги // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – Вып. 16. – С. 76-81.
2. Григорьев А.Н., Павленко А.В. Давление при электрическом взрыве металлических фольг // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 18. – С. 65-72.
3. Павленко А.В., Григорьев А.Н., Афанасьев В.Н. и др. Волна давления при наносекундном электрическом взрыве вольфрамового проводника в воде // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 81-89.
4. Способ генерирования импульсного давления электрическим взрывом проводника: Заявка на патент РФ № 2011134969 МПК⁷ Н 03 К 3/53 от 19.08.2011 / Григорьев А.Н., Павленко А.В.
5. Григорьев А.Н. Потери энергии в разряднике и его коммутационная характеристика при электрическом взрыве проводника // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313– № 4. Энергетика – С. 72-77.
6. Григорьев А.Н., Павленко А.В. Влияние скорости ввода энергии (индуктивности контура) на генерацию ударной волны и импульса перенапряжения при электрическом взрыве фольги // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 50-53.
7. Grigoriev A.N., Pavlenko A.V. Characteristics of a Multi-channel Surface Discharge Switch for a High Current Generator // IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation. – 2007. – V.14. – № 4. – P. 964-967.
8. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 1. Особенности развития и существования поверхностного разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 66-69.
9. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 2. Исследование сильноточного коммутатора // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 79-82.
10. Grigoriev A.N., Pavlenko A.V. Circuit Inductance Influence on Shock Wave Generation under Electrical Explosion of Foil. 14th Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, 2006 // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 11. Приложение. – С.209-211.
11. Григорьев А.Н., Павленко А.В. Неоднородность формирования волны давления при электрическом взрыве фольг // Экстремальные процессы и состояния: X Забабахинские научные чтения. – Снежинск, 2010. – С. 151.
12. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Карнаухов Е.И. Давление при электрическом взрыве металлических фольг // Труды Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», Томск, 14-16 сентября 2009 г. – С. 203-209.
13. Grigoriev A.N., Pavlenko A.V. Experimental Study of a Switching Time Characteristic for a Multi-Channel Surface Discharge Switch // Modern Techniques and technol-

ogy MTT'2007. Proc. 13th Int. Scientific and Practical Conference of Student, Postgraduates and Young Scientist. – P. 15-17.

14. Pavlenko A., Grigoriev A., Afanas'ev V., et. al. Pressure measurements for tungsten wire explosion in water // SCCS-2005: Proceedings of the Int. Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems. – Moscow, Russia. – P. 24.

15. Григорьев А.Н., Ильин А.П., Павленко А.В. Влияние импульсного тока на структуру медного проводника // VII Всероссийская конференция "Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем" 22-24 ноября, 2005. Ершово, Моск. обл. – С. 58-59.

16. Григорьев А.Н., Ильин А.П., Тихонов Д.В. Влияние скорости и величины вводимой в электрически взрывааемый проводник энергии на характеристики получаемых нанопорошков // VII Всероссийская конференция "Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем" 22-24 ноября, 2005г. Ершово, Моск. обл. – С. 60-61.

17. Григорьев А.Н., Тихонов Д.В. Связь параметров электрического взрыва проводников с характеристиками получаемых нанопорошков // Современная техника и технологии СТТ'2004. Труды X международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 2. – С 24-26.

18. Kwon Y.S., Ilyin A.P., Grigoriev A.N., Tikhonov D.V. Dynamics of particles formation of metals and their compounds during the electrical explosion of wires // Proceedings of 8th Korean-Russian Int. Symposium on Science & Technology – KORUS 2004., Vol. 3. Tomsk, Russia. – P. 110–112.

19. Kwon Y.-S., Ilyin A., Grigoriev A., Tikhonov D., Nazarenko O. Metal Heat Treatment by Short Impulse of Electrical current // Proceedings of 20th Int. Conference on Heat Treatment, Czechia, Jihlava, 23–24.11.2004. – P.175–176.