

На правах рукописи



ЧЕБОТНЯГИН Леонид Михайлович

СОЕДИНИЕ ТРУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ
РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
РАЗРЯДА

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет».

Научные руководители: Лопатин Владимир Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор
Потапов Василий Васильевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Абдуллин Эдуард Нуруллоевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт сильноточной электроники», г.Томск, ведущий научный сотрудник
Афанасьева Светлана Ахмед-Рызовна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, НИИ Прикладной математики и механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ОАО Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения (ОАО «ИркутскНИИхиммаш»), г.Иркутск

Защита состоится 26 ноября 2014 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, д. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г.Томск ул.Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан 01 октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В энергетической, атомной, нефтехимической и других отраслях промышленности широко используются теплообменные аппараты. Надёжность и долговечность их работы при высоких температурах и давлениях, в агрессивных средах и колебательных нагрузках, определяется качеством соединения труба – трубная решетка. Соединение должно обладать высокой прочностью, герметичностью и коррозионной стойкостью. Развальцовка, традиционная сварка и пайка обеспечивают надежность работы соединения, однако, очень затратны и нетехнологичны при монтаже или ремонте аппаратов. Все нагрузки, которые воспринимает труба при температурном расширении и вибрациях, передаются на соединение, что вызывает его разрушение и выход из строя оборудования. Поэтому совершенствование технологии получения качественного соединения труба – трубная решетка является актуальной проблемой. Под качественным соединением понимается максимальная площадь сварки между трубой и трубной решеткой. С 50-х годов получили развитие технологии, основанные на применении импульсных источников давления (взрывчатые вещества (ВВ), импульсное магнитное поле, расширяющийся плазменный канал электрического разряда). Такие источники позволяют деформировать детали со скоростями 10-1000 м/с, а при их соединении обеспечивают сварку.

Динамику волн импульсного давления в средах исследовали Л.И. Седов, Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, В.Е. Накоряков, В.Е. Фортов и др.. Исследования А.А. Дерибаса, И.Д. Захаренко, В.М. Кудинова и др. сотрудников Института гидродинамики СО РАН и др. учреждений легли в основу технологий штамповки и сварки взрывом. Однако, такие технологии требуют обеспечения особых мер безопасности. Технология, основанная на использовании импульсного магнитного поля, ограничена в применении конструкцией и механической прочностью индуктора и требует дополнительных исследований. Исследованиям расширяющегося плазменного канала электрического разряда как источника ударных и акустических волн, которыми занимались и занимаются Е.В. Кривицкий, Б.Я. Мазуровский, Н.Н. Столович, А.А. Воробьев, Б.В. Семкин, И.З. Окунь, К.А. Наугольных, Н.А. Рой, В.В. Лопатин, А.Л. Куперштох и др.. Однако, до сих пор неизвестны закономерности кинетики деформирования и возможности получения качественной сварки металлов импульсным давлением расширяющегося плазменного канала. Исследования по определению параметров соударения, обеспечивающих сварку трубы с трубной решеткой, практически не проводились.

Идея работы заключается в исследовании кинетики деформирования труб импульсным давлением расширяющегося плазменного канала и определении параметров соударения, обеспечивающих качественную сварку трубы с трубной решеткой.

Цель работы: Экспериментальные исследования скоростного деформирования импульсным давлением от расширяющегося плазменного канала электрического разряда и разработка физико-математической модели для управления качеством сварки трубчатых деталей.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Выделить основные процессы, определяющие качество соединений трубчатых деталей при воздействии импульсного давления расширяющегося плазменного канала.

2. Экспериментально установить закономерности кинетики скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением.

3. Разработать физико-математическую модель скоростного деформирования с учётом волновой динамики.

4. Создать алгоритм определения параметров соударения для управления качеством сварки.

5. Разработать практические рекомендации по управлению качеством сварки.

Методы исследований. Для исследования энергетических характеристик канала электрического разряда использовался осциллографический метод. Регистрация кинетики деформирования осуществлялась с помощью теневой покадровой съемки скоростным фоторегистратором. Используются методы математического моделирования, численные расчёты.

Научная новизна.

1. Получены результаты экспериментальных исследований кинетики скоростного деформирования металлических цилиндров, позволившие определить скорость деформирования;

2. Установлен дискретный характер кинетики деформирования, причиной которой являются особенности волновой динамики в цилиндрической симметрии;

3. Разработана акусто-электроволновая модель для расчета скорости и профиля деформации металлов в цилиндрической симметрии;

4. Создан алгоритм определения параметров соударения для управления качеством сварки труб с трубной решеткой.

Научно-практическая значимость.

1. Разработаны рекомендации по оптимизации электровзрывной сварки трубчатых металлических деталей;
2. Разработан способ оптимизации конструкции электровзрывных картриджей.

Достоверность полученных результатов подтверждается повторяемостью и согласованностью экспериментальных и расчетных результатов, непротиворечивостью результатов с известными в литературе данными.

Личный вклад автора заключается в анализе опубликованных литературных данных по теме исследования, постановке и проведении экспериментов, анализе, описании и интерпретации полученных экспериментальных данных, в разработке физико-математической модели, алгоритмов и рекомендаций исследуемых процессов. При непосредственном участии автора сформулированы научные положения и основные выводы диссертации. Опубликованные в соавторстве работы, выполнены при его непосредственном участии.

На защиту выносятся следующие положения диссертационной работы:

- закономерности кинетики деформирования труб импульсом давления от расширяющегося плазменного канала электрического разряда;
- обнаруженная дискретность и неравномерность кинетики деформирования труб в рабочей зоне электровзрывного картриджа является следствием динамики акустических волн в передающей среде картриджа;
- на аналогии динамики акустических волн в передающих средах и электромагнитных волн в линиях с распределенными параметрами создана акусто-электроволновая модель, описывающая кинетику деформирования и профиля деформации в цилиндрической симметрии;
- алгоритм определения параметров соударения для управления качеством сварки труб с трубной решеткой импульсом давления от расширяющегося плазменного канала;
- способ оптимизации электровзрывного картриджа за счёт определения необходимой толщины его торцевых пробок.

Апробация работы. Основные результаты работы изложены в 21 печатной работе, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Материалы диссертационной работы докладывались на II Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2012г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 2009, 2010, 2011,

2012гг.), IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2012г.), XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2011г.), 9-ой и 10-ой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2010г.), Научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию ИрГТУ «Технико-экономические проблемы развития регионов» (г. Иркутск, 2010г.), Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационное развитие горно-металлургической отрасли» (г. Иркутск, 2009г.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы и приложений: всего 137 страниц, включая 43 рисунка, 8 таблиц, 7 приложений и список литературы из 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены методы исследования, сформулированы научная новизна, практическая ценность результатов исследования и основные положения выносимые на защиту.

В первом разделе рассматривается феноменология генерирования импульсных волн давления. Показано, что источником импульсных волн давления с амплитудой на фронте ударной волны 10^9 - 10^{10} Па, распространяющихся в жидкости с околосвуковой скоростью, и обеспечивающих давление более 100 МПа на расстояниях до нескольких десятков миллиметров, является расширяющийся плазменный канал электрического разряда, инициированный электрическим взрывом проводника в воде.

Основными областями технологического применения скоростного деформирования являются: сварка и штамповка взрывом, магнитно-импульсный способ деформирования металлов, электровзрывная штамповка и сварка деталей. Показано, что перспективным для технологического применения является скоростное деформирование труб и сварка трубчатых деталей импульсным давлением расширяющегося плазменного канала. Сформулированы основные требования к параметрам разрядного контура импульсного генератора и деформируемому материалу. По результатам анализа существующих технологий

сформулирована цель работы и определены основные задачи, которые необходимо решить для её достижения.

Во втором разделе автором получены выражения и упрощенная аналитическая связь параметров разрядного контура импульсного генератора (ИГ) с характеристиками импульсной волны давления

$$P = P_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

$$P_m = \frac{A}{\cos^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} \cdot \frac{U \cdot C^{1/4}}{L^{3/4}} \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2T} \cdot t\right)$$

$$\tau = 4,53 \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

где P_m – амплитуда импульсной волны давления (при $0 \leq t \leq T/4$ - P_m практически постоянна, при $T/4 \leq t \leq T/2$ - P_m спадает в два раза), T – период колебания тока, A – некоторая эмпирическая константа, τ – время спада импульсной волны давления, U , C , L – соответственно напряжение, емкость и индуктивность разрядного контура ИГ.

Экспериментальная установка (ИГ), состояла из зарядного устройства с системой управления и сигнализации, накопителя энергии, коммутатора, высоковольтного электрода и системы заземления. Разрядный контур включал последовательно соединенные накопитель энергии, коммутатор, нелинейное сопротивление плазменного канала и индуктивность контура. Измерение импульсных токов осуществлялось поясом Роговского. Сигналы импульсов тока передавались с помощью коаксиальных радиочастотных кабелей к импульсному осциллографу.

Кроме параметров разрядного контура ИГ на скоростное деформирование влияет конструкция электровзрывного картриджа. В картридже применялся алюминиевый проводник диаметром 0,6-0,8 мм, свернутый в спираль. Исследовалось влияние количества витков спирали на стабильность режима работа ИГ и деформирование. Варьировалось напряжение (15, 25, 35, 45 кВ), индуктивность разрядного контура (2,17 – 5,5 мкГн), число витков спирали проводника (3-12 витков), емкость (15, 18, 21, 24 мкФ). Картридж плотно прилегал к стенкам деформируемой трубы (эскиз картриджа представлен на Рисунке 1). Типичная осциллограмма тока приведена на Рисунке 2.

Анализ полученных результатов экспериментов показывает, что с увеличением числа витков от $K = 3$ до 12 вероятность межвиткового перекрытия и отсутствие деформирования с перекрытием на трубу существенно возрастало (на 3 витках составляло 25%, на 6 – более 60%, на 9 – более 80%, на 12 – практически

100%), что, видимо, связано с увеличением объемного присутствия проводника в картридже и облегчением условия замыкания разряда на трубу.

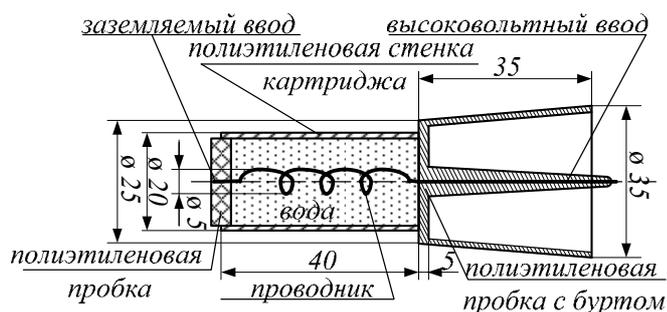


Рисунок 1. Эскиз электровзрывного картриджа

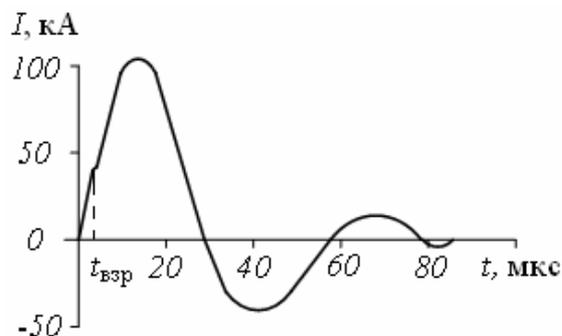


Рисунок 2. Осциллограмма тока, пунктиром указан момент взрыва проводника ($t_{взр}$)

Параллельно с расчетом и осциллографированием выполнена оптическая теневая скоростная фоторегистрация деформирования труб. Типичные результаты фоторегистрации представлены на Рисунок 3, там же показан увеличенный кадр соответствующий моменту времени $t = 12,012$ мкс.

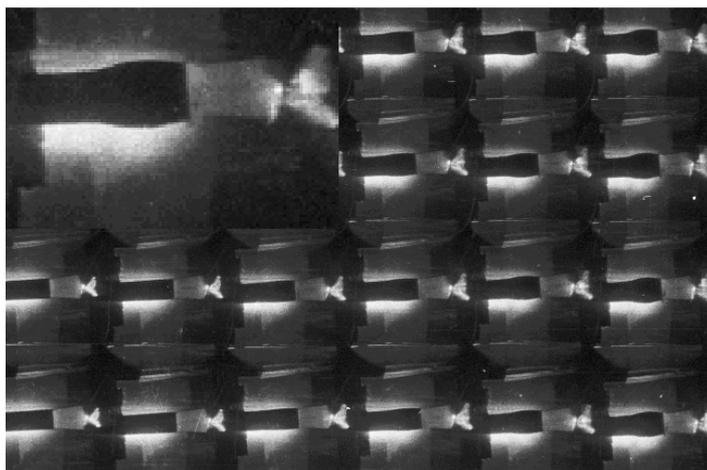


Рисунок 3. Кадры скоростного деформирования латунной трубы Л70 $\text{Ø}25 \times 2,5$ мм

Для регистрации использовался скоростной фоторегистратор СФР-2М, время между кадрами 0,572 мкс, направление съемки для каждого столбца снизу-вверх на Рисунке 3. В экспериментах обеспечивалась синхронизация регистрации тока, скоростной фоторегистрации и подсветки. По результатам обработки кадров фоторегистрации построена кинетика деформирования (Рисунок 4).

Из экспериментов установлено, что при $U < 40$ кВ и равномерном увеличении емкости наблюдается линейное возрастание скорости деформирования, при $40 < U < 50$ кВ и $C = 15-21$ мкФ возрастания скорости деформирования не происходит, при $40 < U < 50$ кВ и $C = 21-24$ мкФ скорость деформирования имеет тенденцию к снижению.

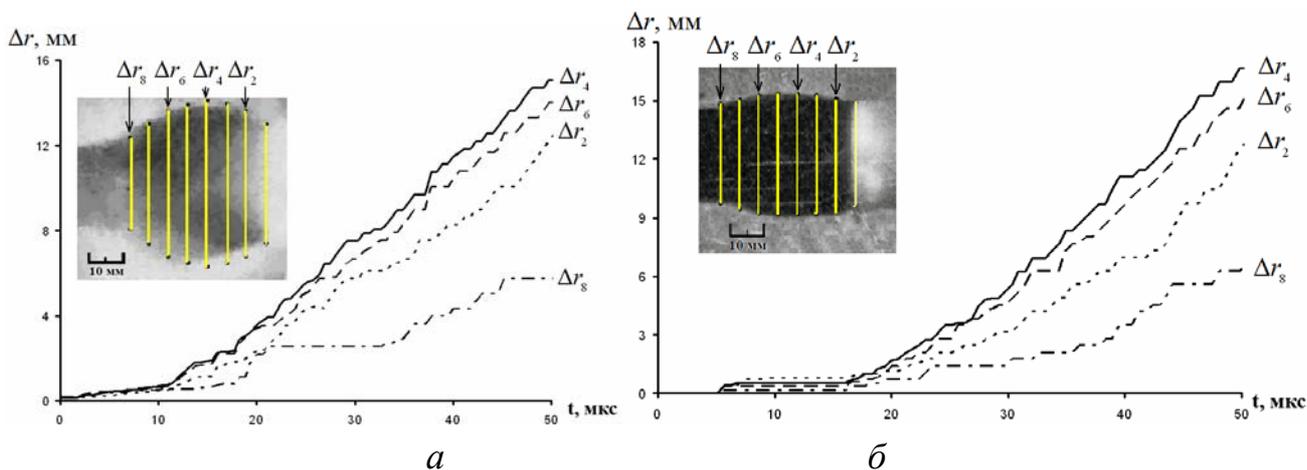


Рисунок 4. Кинетика деформации труб: сверху кадры скоростной съёмки с сечениями по длине трубы Δr_2 , Δr_4 , Δr_6 , Δr_8 ; внизу деформация труб из сплавов: а – АД1; б – Л70

При $C = 24$ мкФ и $U = 50$ кВ сварки труб с трубными решетками не наблюдается, происходит разрушение трубы и повреждение отверстия трубной решетки. Таким образом, для обеспечения требуемых скоростей деформирования рекомендуется использовать режим при $U < 40$ кВ и $C < 15-21$ мкФ.

В третьем разделе приведены результаты анализа оптических исследований скоростного деформирования труб и экспериментального определения закономерностей кинетики деформирования. Обнаружена дискретность характера деформирования труб, обусловленная динамикой акустических волн давления от расширяющегося плазменного канала в цилиндрической симметрии. Установлено, что неравномерность деформирования по сечениям Δr_i трубы и увеличение дискретности к ее краям обусловлены влиянием импульсных волн давления, отраженных от торцов электровзрывного картриджа. Задержка деформирования разных сплавов зависит от предела их текучести и плотности.

По величине скорости продвижения полиэтиленовой пробки в торце картриджа под действием импульсной волны давления определялась скорость фронта волны давления, которая составила ≈ 1000 м/с, и оценивалась амплитуда давления, составившая для исследованных режимов около 750 МПа.

Оценки скоростей деформирования стенок труб в сечениях Δr_i показали, что при $t \leq 15$ мкс имеется незначительный рост скоростей до 100 м/с (Рисунок 4). Затем скорость растет и достигает в центральных сечениях, например Δr_4 , 400 – 500 м/с. В крайних сечениях, например Δr_8 , скорость составляет 100 – 200 м/с и сильнее проявляется дискретность.

По аналогии с описанием движения свободной пластины под действием фронта ударной волны и с учётом дивергенции волн при цилиндрической симметрии в линейно-акустическом приближении составлено дифференциальное уравнение, описывающее деформирование стенки трубы импульсным давлением

$$2 \cdot P_1(t) = m \frac{du(t)}{dt} + u(t) \cdot \left(\rho_0 \cdot c_0 + \frac{\eta \cdot 2 \cdot h}{r^2 \cdot \sqrt{3}} \right), \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости деформируемых труб, $m = M/S$, где $M = h \cdot \rho_2$ и S – масса и площадь деформируемого участка трубы; ρ_2 – плотность материала трубы; h – толщина стенки трубы; r – внутренний радиус трубы, $u(t)$ – скорость деформирования, ρ_0 и c_0 – плотность и скорость звука в воде. Произведения $m \frac{du(t)}{dt}$ и $u(t) \cdot \rho_0 \cdot c_0$ в выражении (2) описывают движение стенки под действием импульсного давления, пришедшего от источника расположенного в воде. Для учёта пластичности материала трубы при скоростном деформировании, вызванной диссипативными потерями и разогревом металла, в выражение (2) введено произведение с коэффициентом η .

Из выражения (2) получены выражения для оценки скорости деформирования и деформации. Вычисляемые с помощью полученных выражений значения сопоставимы с экспериментальными. Также вычислены значения коэффициентов η при скоростях до 600 м/с, которые дополняют ранее полученные данные из исследований по сварке взрывом.

Однако, выражение (2) не учитывало влияние свободных поверхностей картриджа на деформирование трубчатых деталей. Для их учета и анализа распространения импульсных волн давления рассмотрена схема деформирования цилиндра в радиальном направлении импульсным давлением, с источником в виде расширяющегося плазменного канала (Рисунок 5).

Учёт влияния свободной поверхности произведен с помощью вторичных источников волны давления отрицательной амплитуды, зеркально расположенных на оси с реальным источником – расширяющимся плазменным каналом.

Импульсное давление, действующее на поверхность деформируемой трубы в точке А, равно векторной сумме волн импульсного давления от источника и волн, отраженных от свободных поверхностей

$$2 \cdot P_A(t) = 2 \cdot P(t) - 2 \cdot P_1(t) - 2 \cdot P_2(t) = 2 \cdot P(t) - [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1](t - \tau_1) - [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2](t - \tau_2), \quad (3)$$

где $P(t)$ – импульс давления, приходящий от реального источника в радиальном направлении, $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – импульсы давления, отраженные от

вторичных источников по оси цилиндра и приходящие в точку A с запаздыванием по времени τ_1 и τ_2 соответственно, $I(t - \tau_1) = \begin{cases} 0, t \leq \tau_1 \\ 1, t \geq \tau_1 \end{cases}$ и $I(t - \tau_2) = \begin{cases} 0, t \leq \tau_2 \\ 1, t \geq \tau_2 \end{cases}$ – импульсные функции, где τ_1 и τ_2 – время запаздывания прихода импульсных волн давления от вторичных на поверхность деформируемого участка трубы (Рисунок 5)

$$\tau_1 = \frac{r_1 - r_n}{c_0}, \tau_2 = \frac{r_2 - r_n}{c_0}, \quad (4)$$

где r_1 и r_2 – длины пробега волны импульсного давления от вторичных источников до точки A ; α_1 и α_2 – углы падения волн давления от вторичных источников в точке A ; r_n – длина пробега волны давления от основного источника.

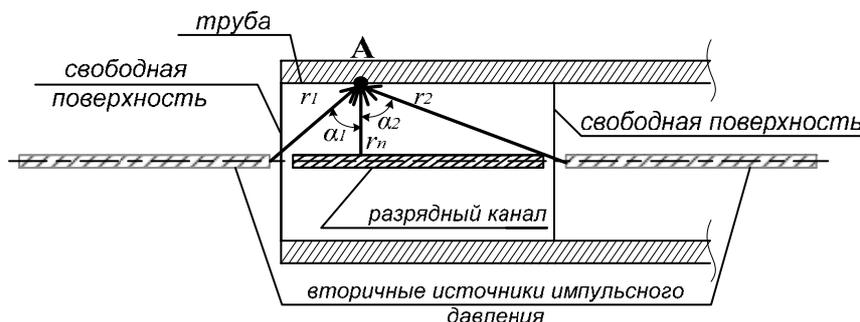


Рисунок 5. Схема для оценки влияния волн импульсного давления отраженных от свободных поверхностей на деформирование трубы

На основе аналогии электромагнитных волновых процессов в линиях с распределенными параметрами и динамики акустических волн в средах разработана акусто-электроволновая модель для расчета скорости и профиля деформации металлов в цилиндрической симметрии (Таблице 1).

Для определения напряжения в нагрузке (Рисунок 6) составлено дифференциальное уравнение, аналог уравнения (2)

$$2 \cdot U(t) = Z_w \cdot i + L_n \cdot \frac{di}{dt} + R_n \cdot i, \quad (5)$$

где $U(t)$ – аналог падающей волны давления $P(t)$;

$$L_n \cdot \frac{di}{dt} \equiv m \cdot \frac{du}{dt}; R_n \cdot i \equiv \frac{\eta}{r_0^2} \cdot \frac{2h}{\sqrt{3}} \cdot u; Z_w \cdot i \equiv \rho_0 \cdot c_0 \cdot u.$$

Модель позволяет, используя готовые программные продукты, такие как MATLAB и Simulink, моделировать скоростное деформирование. Схема модели представлена на Рисунке 6.

На Рисунке 6: Z и U_0 – импеданс и напряжение источника; R_1, R_2, C, L_1 – параметры линии с распределёнными параметрами, соответствующие акустическому сопротивлению среды Z_w ; $U(t)$ – напряжение на входе линии,

аналог моделируемого давления; i – электрический ток, аналог скорости деформирования трубы. Нагрузка представлена: индуктивностью L_n , соответствующей m и сопротивлением R_n для учёта коэффициента η .

Таблица 1. Аналогия электромагнитных и акустических волн

для волн напряжения и тока в электроволновой линии	для акустических волн
$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial U}{\partial t}$	$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}$
$-\frac{\partial U}{\partial x} = L \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$	$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$
$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0$	$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0$
$v_{эм} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$	$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
$z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$	$z_{ак} = \sqrt{E \cdot \rho} = c_0 \cdot \rho_0$
$\begin{cases} U = U_{наод} (x - v \cdot t) + U_{омп} (x + v \cdot t) \\ i = \frac{1}{z_w} \cdot [U_{наод} (x - v \cdot t) + U_{омп} (x + v \cdot t)] \end{cases}$	$\begin{cases} P = P_{наод} (x - c_0 \cdot t) + P_{омп} (x + c_0 \cdot t) \\ u = \frac{1}{z_{ак}} [P_{наод} \cdot (x - c_0 \cdot t) + P_{омп} (x + c_0 \cdot t)] \end{cases}$

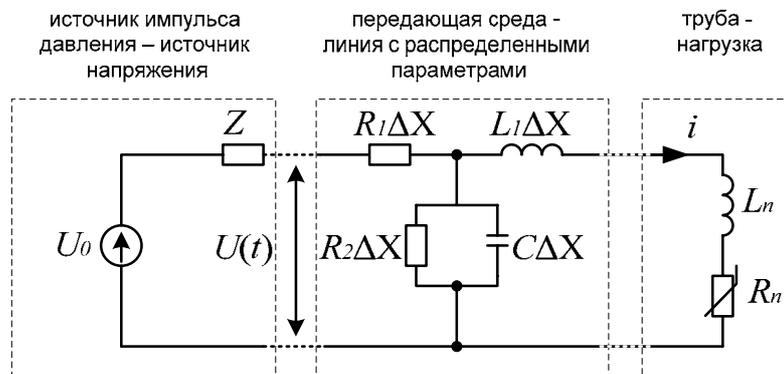


Рис. 6. Схема акусто-электроволновой модели

Источник импульсного напряжения воспроизводит напряжение на нагрузке, аналог (3)

$$\begin{aligned}
 U(t) = & U_m (e^{-t/\theta} - e^{-t/\tau}) - \\
 & - [U_m \cdot (e^{-(t-\tau_{z1})/\theta} - e^{-(t-\tau_{z1})/\tau}) \cos \alpha_1] \cdot I(t - \tau_{z1}) - \\
 & - [U_m \cdot (e^{-(t-\tau_{z2})/\theta} - e^{-(t-\tau_{z2})/\tau}) \cos \alpha_2] \cdot I(t - \tau_{z2})
 \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом выражений (5) и (6) выполнено моделирование, по результатам которого построены расчетные кинетики деформирования труб, сопоставленные с

экспериментальными скоростными снимками деформации для труб из марки АД1 (28x4 мм) и Л70 (25x2,5 мм). На Рисунке 7. приведены типичные расчетные (точки, образующие профиль деформации стенки трубы) и экспериментальные снимки скоростной регистрации для одного из исследованных образцов.

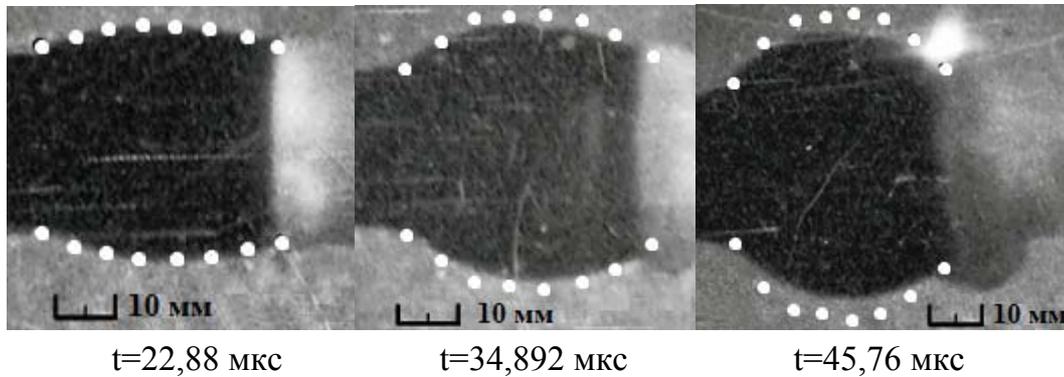


Рис.7. Расчетные (точки) и экспериментальные скоростные снимки деформации для трубы из сплава Л70 (25x2,5 мм) для некоторых моментов времени

Экспериментальные и расчетные кинетики деформирования в сечениях Δr_1 и Δr_5 приведены на Рисунке 8 (приведены для латунных труб Л70, для алюминиевых труб типичны). На Рисунке 8 приведен кадр соответствующий моменту времени $t=22,88$ мкс.

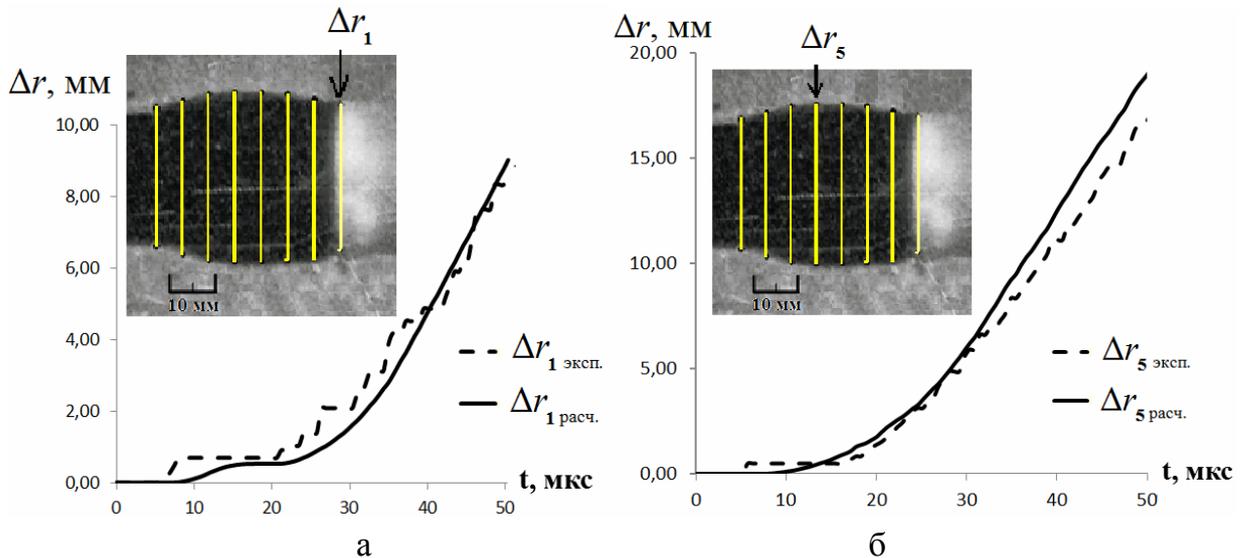


Рисунок 8. Кинетика расчетного (пунктир) и экспериментального деформирования латунных Л70 (а, б) труб в сечениях Δr_1 и Δr_5

В четвертом разделе проведены исследования по управлению профилем деформации трубы. Для этого выполнены расчеты с помощью акусто-электроволновой модели скоростного деформирования стальных труб марки Ст.3, используемой при производстве и ремонте теплообменных аппаратов с внешним радиусом $r = 17$ мм, с толщиной стенки $h_2 = 3,5$ мм, $\rho_2 = 7850$ кг/м³, $\eta = 4 \cdot 10^4$ Па*с,

давление пластического течения стали Ст.3 $P_{пл} = 225$ МПа, амплитуда и время спада волны давления рассчитаны по формулам (1) и из решения (2) и составляют $\tau = 58,19$ мкс, $\theta = 12,96$ мкс (θ – постоянная времени спада импульса волны давления, значение которой определяется свойствами передающей среды и трубы), $\tau_с = 7,53$ мкс, $P_m = 263$ МПа для $U = 30$ кВ, $C = 30$ мкФ, $L = 5,5$ мкГн. При моделировании увеличивали расстояние от канала до свободной поверхности торца картриджа (увеличивали толщину пробки h_t с 5 мм до 20 мм, с шагом 5 мм) (Рисунок 1).

Для выбранных энергетических параметров ИГ и увеличений толщины пробки картриджа, использованных в расчетах, выполнена серия экспериментов по скоростному деформированию труб. Сопоставлены экспериментальные и рассчитанные профили деформации.

На Рисунке 9 приведен типичный профиль деформации для картриджа с толщиной пробки 20 мм (стрелкой показано направление деформирования). При толщине пробки более 20 мм изменения кинетики деформирования труб и профиля деформации практически не наблюдалось, что связано с предельно малыми значениями давлений от вторичных источников. Таким образом, варьируя толщину пробки можно управлять профилем деформации и скоростью деформирования.

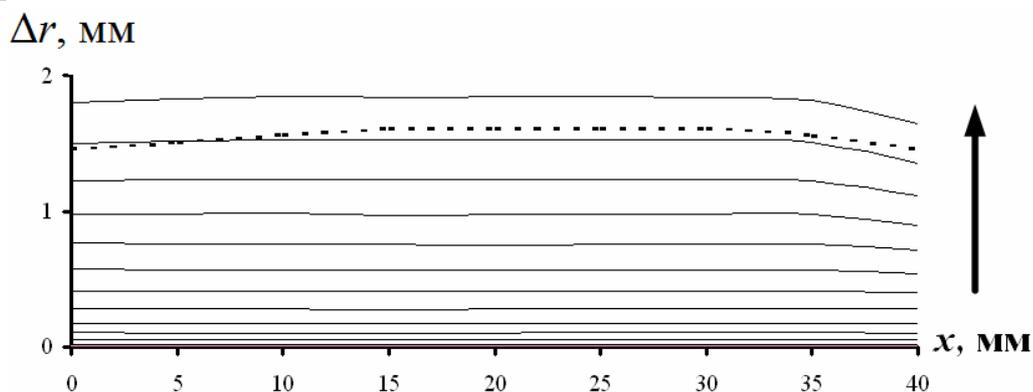


Рисунок 9. Экспериментальные (пунктир) и расчётные (сплошная) кинетики профилей деформации ($h_t = 20$ мм)

Зная расстояния между соединяемыми деталями и профиль деформации трубы, оцениваются параметры соударения (скорость деформирования, скорость точки контакта ($V_{тк}$) и угол соударения (γ)). Для их оценки разработан алгоритм определения зоны сварки труб с трубной решеткой, включающий следующие этапы.

1. Составляется схема соединения трубчатых деталей (Рисунок 10).

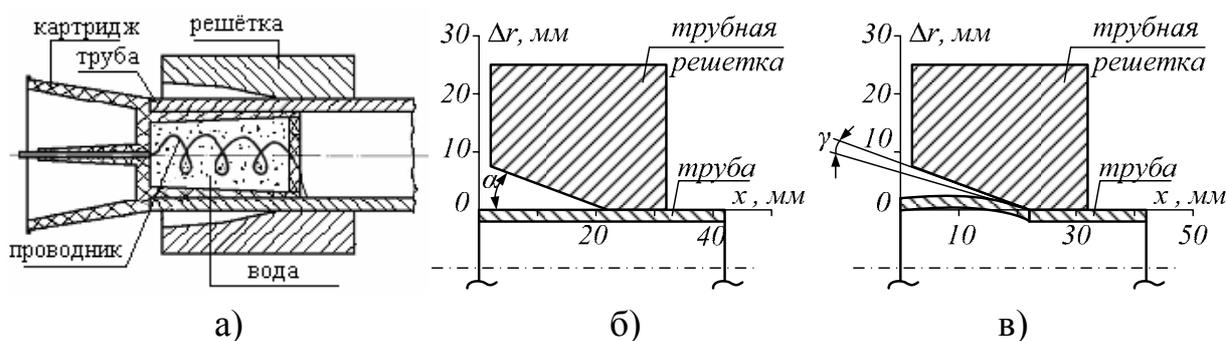


Рисунок 10. Схема соединения трубчатых деталей: а) схема расположения картриджа, трубы и трубной решётки; б) до деформирования; в) после деформирования

2. Для построения профилей деформации и кинетики деформирования трубы с учетом выбора ее геометрических параметров, давления, обеспечивающего пластическое течение материала трубы, геометрии электровзрывного картриджа, параметров разрядного контура ИГ, выполняется компьютерное моделирование с помощью акусто-электроволновой модели.

3. По результатам моделирования строится массив деформаций $\Delta r_n(x_n, t_n)$, где x_n – расстояние от торца трубы по внешней поверхности трубы до сечения n , t_n – время деформирования до соударения в сечении n , на стадии моделирования n выбирается произвольно. По результатам составляется массив значений (Таблица 2).

Таблица 2. Массив величины деформации $\Delta r_n(x_n, t_n)$

$\Delta r_n(x_n, t_n)$	x_1	x_2	...	...	x_{n-1}	x_n
t_1	$\Delta r_1(x_1, t_1)$	$\Delta r_1(x_2, t_1)$	...	...	$\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_1)$	$\Delta r_n(x_n, t_1)$
t_2	$\Delta r_2(x_1, t_2)$	$\Delta r_2(x_2, t_2)$	...	...	$\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_2)$	$\Delta r_n(x_n, t_2)$
...
t_{n-1}	$\Delta r_{n-1}(x_1, t_{n-1})$	$\Delta r_{n-1}(x_2, t_{n-1})$	...	...	$\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_{n-1})$	$\Delta r_n(x_n, t_{n-1})$
t_n	$\Delta r_n(x_1, t_n)$	$\Delta r_n(x_2, t_n)$	...	...	$\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n)$	$\Delta r_n(x_n, t_n)$
t_{n+1}	$\Delta r_n(x_1, t_{n+1})$	$\Delta r_n(x_2, t_{n+1})$	...	...	$\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_{n+1})$	$\Delta r_n(x_n, t_{n+1})$

Далее строится профиль деформирования относительно координаты x , где каждая кривая деформирования трубы соответствует своему моменту времени t (Рисунок 11).

4. По профилю деформирования и углу конусной разделки для каждого сечения $n(x_n)$ определяется $\Delta r_n(x_n, t_n)$ в точке соударения (пересечение профиля с трубной решеткой), $\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n)$ и $\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_{n+1})$ в соседних сечениях (Рисунок 11).

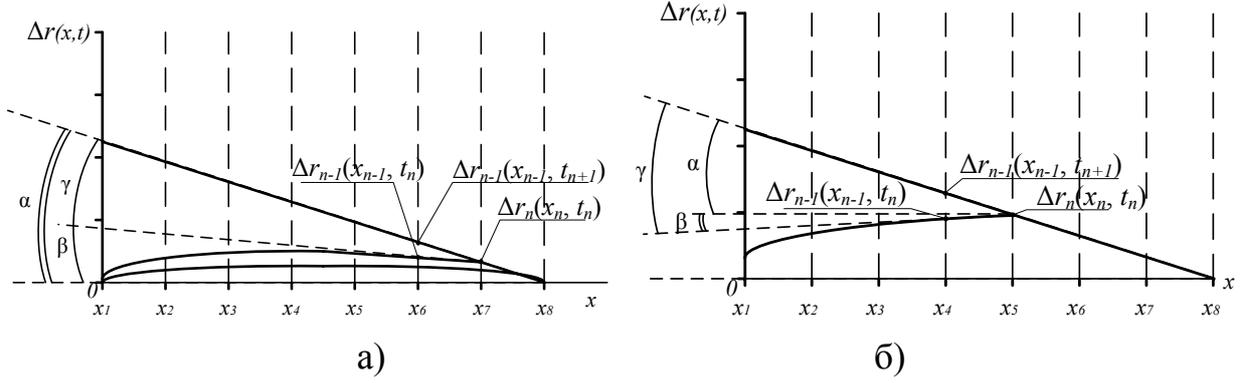


Рисунок 11. Схемы определения угла соударения

5. Определяется γ как сумма (разность) углов α – угол конусной разделки и β – угол, образованный касательной в точке соударения к поверхности деформируемого участка трубы.

Если $\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_{n+1}) \geq \Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n) \geq \Delta r_n(x_n, t_n)$ (Рисунок 11, а), то

$$\gamma = \alpha - \beta, \quad (7)$$

где β определяется из соотношения

$$\cos \beta = \frac{\Delta x}{\sqrt{(b_{n-1} - b_n)^2 + \Delta x^2}} \rightarrow \beta = \arccos \left[\frac{\Delta x}{\sqrt{(b_{n-1} - b_n)^2 + \Delta x^2}} \right]. \quad (8)$$

Здесь $\Delta x = x_n - x_{n-1}$.

Если $\Delta r_n(x_{n-1}, t_{n+1}) \geq \Delta r_n(x_n, t_n) \geq \Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n)$ (Рисунок 11, б)

$$\gamma = \alpha + \beta, \quad (9)$$

где β определяется по выражению (8).

Если $\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n) \geq \Delta r_n(x_n, t_n) \geq \Delta r_n(x_n, t_n)$, то точка контакта имеет противоположное направление и перемещается от $\Delta r_{n-1}(x_{n-1})$ к $\Delta r_n(x_n)$, тогда условие имеет вид $\Delta r_{n-1}(x_{n-1}, t_n) \geq \Delta r_n(x_n, t_{n+1}) \geq \Delta r_n(x_n, t_n)$

$$\gamma = \beta - \alpha, \quad (10)$$

где β определяется

$$\beta = \arctg \left[\frac{\Delta r_{n-1} - \Delta r_n}{\Delta x} \right]. \quad (11)$$

6. Определяем V_{mk} . Перемещение Δl от точки $\Delta r_n(x_n)$ до точки $\Delta r_{n-1}(x_{n-1})$ по поверхности трубной решётки (Рисунок 11)

$$\Delta l = \frac{\Delta x}{\cos \alpha} \quad (12)$$

Величину скорости точки контакта оцениваем по формуле

$$V_{mk} = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot \cos \alpha} = \frac{\Delta r}{\Delta t \cdot \sin \alpha} \quad (11)$$

где $\Delta r = \Delta r_{n-1}(x_{n-1}) - \Delta r_n(x_n)$; $\Delta t = t_{n-1} - t_n$.

7. Составляется зависимость в системах координат (V_{mk}, γ, x) , в которой по координатам (V_{mk}, γ) обозначена область сварки.

Границы области сварки могут быть определены эмпирическим или расчетным методами. По алгоритму вычисления параметров соударения (V_{mk}, γ) определены зоны сварки для пары: труба из сплава АД1 $\text{Ø } 28 \times 4$ мм и трубной решётки из сплава АМГ5 (пары АД1 + АМГ5). Построены зависимости в системах координат (V_{mk}, γ, x) для угла конусной разделки трубной решетки $\alpha = 6, 9, 12, 15^\circ$ по схеме (Рисунок 10, б). Экспериментальные зоны сварки для α построены по результатам серии экспериментов электровзрывной сварки пары АД1+АМГ5. Зоны сварки определялись по микрошлифам. Типичный микрошлиф (Рисунок 12) представляет собой периодическую структуру деформируемых металлов, свойственную высокоскоростной деформации.

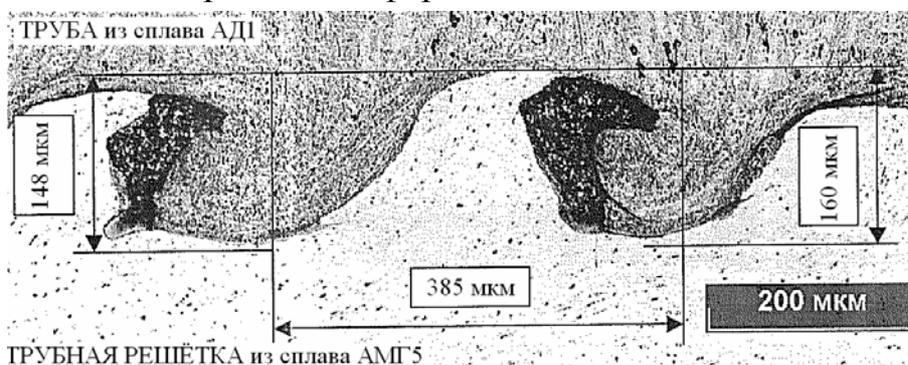


Рисунок 12. Микрошлиф зоны сварки

Из экспериментов по сварке взрывом определена область сварки для пары А1+А1. Область сварки для пары А1+А1 строили в плоскости (V_{mk}, γ) . В этой же плоскости откладывали расчетную кривую $\gamma(V_{mk})$, построенную с помощью алгоритма оценки зон сварки с учетом изменения угла α . По пересечению кривой $\gamma(V_{mk})$ с границами области сварки определялись расчетные зоны сварки. Сопоставление расчетных и экспериментальных зон электровзрывной сварки (Рисунок 13) показало совпадение более 60%.

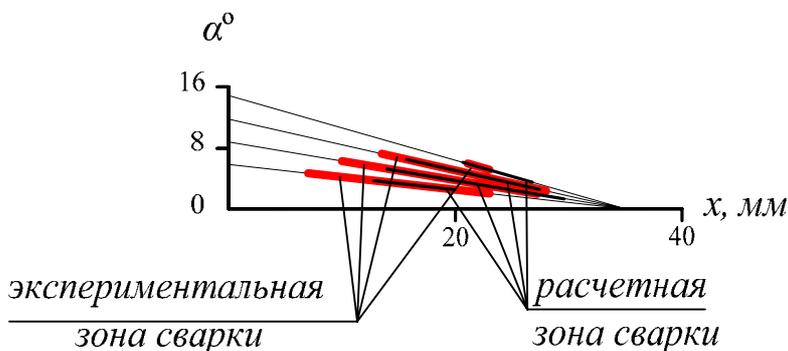


Рисунок 13. Схема сопоставления расчетной и экспериментальной зон электровзрывной сварки для пары АД1 + АМГ5 для углов $\alpha = 6, 9, 12, 15^\circ$

Для пары латунь+сталь в литературе данные о границе области сварки отсутствуют. В этом случае, границы области сварки могут быть вычислены по формулам, приведенным в работе А.А. Дерибаса¹. Для проверки алгоритма проведем экспериментальные и теоретические исследования, а так же оценим его эффективность для энергетического режима ($W=16,8$ кДж, $C=21$ мкФ, $U=45$ кВ) электровзрывной сварки труб Л63 $\varnothing 20 \times 2$ мм с трубной решёткой из стали Ст.20 с углом конусной разделки $\alpha = 1 - 10^0$ с шагом в 1^0 . Длина конической обработки отверстия оставалась неизменной: $l_k=30$ мм. Использовались электровзрывные картриджи внешним диаметром 16 мм и длиной 30 мм, диаметр спирали проводника $d_{cn} = 5$ мм, передающая среда - вода.

На Рисунке 14 в системе координат $\gamma(V_k)$ показаны границы области сварки латуни Л63 со сталью Ст.20, полученные расчётом. На Рисунке 14 обозначены критическое значение скорости точки контакта V_k^{II} , определяющее положение границы пластического течения в окрестностях точки контакта с учётом влияния прочностных свойств, критическое значение скорости точки контакта V_{mk}^{III} , при которой пластическое деформирования прекращается (для Л63 $V_{mk}^{II}=533,7$ м/с, $V_{mk}^{III} = 377,3$ м/с), верхняя граница (ВГ), нижняя граница (НГ), ограничение по скорости звука в металле I.

По разработанному алгоритму произведен расчет V_{mk} и γ . Построены зависимости в системах координат (V_{mk}, γ, x) , в которых на плоскости $\gamma(V_k)$ обозначены границы области сварки пары Л63+Ст.20. По пересечению кривой $\gamma(V_{mk})$ с границами экспериментальной области сварки определялись расчетные зоны сварки. Сопоставление расчетных и экспериментальных зон сварки (Рисунки 15, 16) показало, что:

- при $\alpha = 3 - 9^0$ совпадение составляет 60-95%, что свидетельствует о высокой степени точности предложенной модели и алгоритма расчета зон сварки;
- при $\alpha = 1, 2, 10^0$ совпадение составляет 5-30%, по нашему мнению это обусловлено погрешностью расчетов по оценке границ области сварки и погрешностью модели в связи с принятыми упрощениями.

Таким образом, алгоритм оценки параметров соударения позволяет с вероятностью более 60% определять зоны сварки, а регулируя энергетические параметры ИГ, изменяя конструкцию электровзрывного картриджа и геометрию трубной решетки, управлять параметрами соударения и обеспечивать высокое качество сварки.

¹ Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.

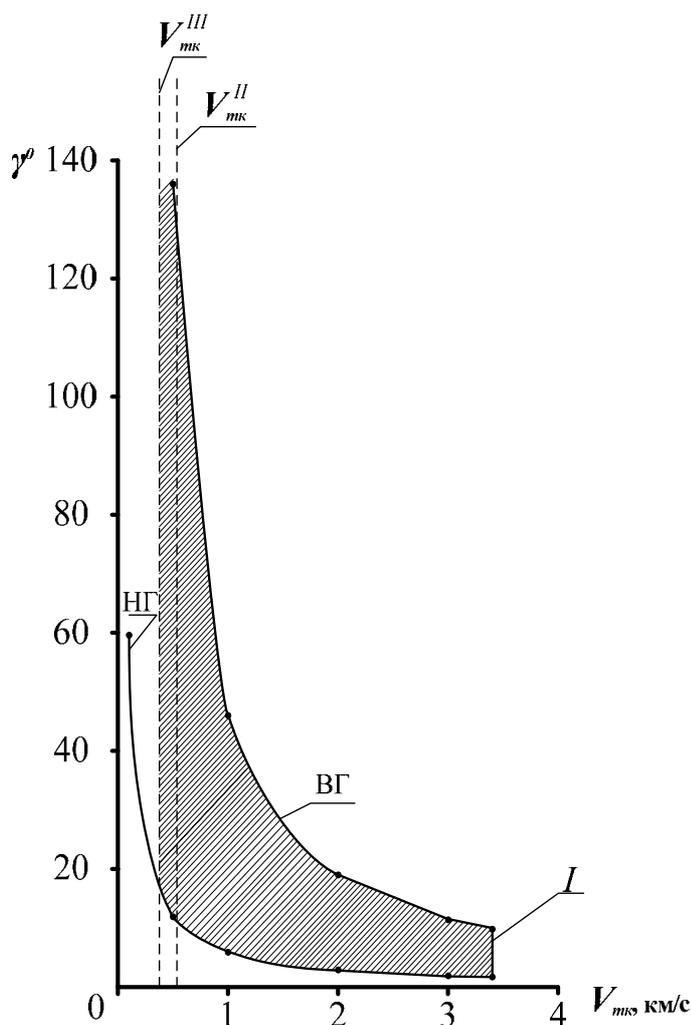


Рисунок 14. Область сварки пары Л63+Ст.20

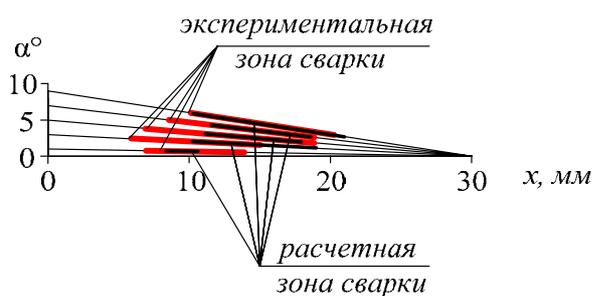


Рисунок 16. Сопоставления расчетной и экспериментальной зон сварки пары Л63 + Ст.20 ($\alpha = 1, 3, 5, 7, 9^0$)

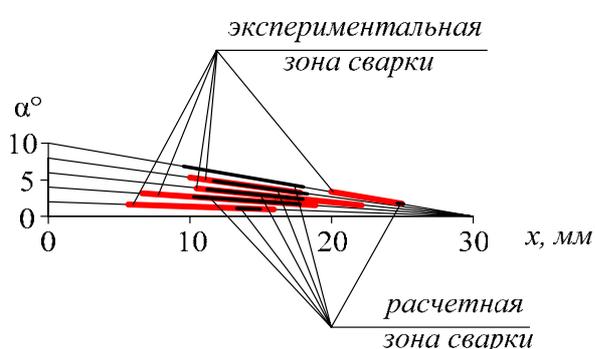


Рисунок 17. Сопоставления расчетной и экспериментальной зон сварки пары Л63 + Ст.20 ($\alpha = 2, 4, 6, 8, 10^0$)

По результатам исследований сформулированы практические рекомендации по регулированию параметров соединения:

- управление величиной амплитуды импульсного давления, обеспечивающего стабильное скоростное деформирование и сварку, возможно за счет регулирования напряжения от 15 до 40 кВ при ёмкости 15 - 21 мкФ, при больших значениях стабильность деформирования и сварка не обеспечиваются;

- количество витков спирали проводника для инициирования канала не должно превышать 6 витков, в противном случае это может привести к межвитковому короткому замыканию или пробоем на трубу с отсутствием деформации;

- управление профилем и скоростью деформирования можно осуществлять увеличением толщины торцевых пробок электровзрывного картриджа,

- необходимый профиль деформации определяется расчетом с помощью акусто-электроволновой модели;

- при сварке труб с трубной решеткой: 1) определяются расчетные или экспериментальные (например, из сварки взрывом для соответствующих металлов) границы области сварки; 2) с помощью алгоритма рассчитываются параметры соударения; 3) строятся расчетные зависимости $\gamma(V_{mk})$, которые сопоставляются с ранее определенными границами области сварки; 4) определяются расчетные зоны сварки, которые сопоставляются с регламентированными или заданными зонами; 5) в зависимости от сопоставления расчетных и заданных зон сварки принимается решение о продолжении расчетов или переходе непосредственно к сварке; 6) при продолжении расчетов регулированию подвергаются (U , C , L), геометрия электровзрывного картриджа и конусность трубной решетки.

ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментальные исследования скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением расширяющегося плазменного канала. Разработан и реализован метод оптической теневой скоростной фоторегистрации. Для исследованных энергетических режимов оценены давления и скорости деформирования, составившие 200 - 750 МПа и 100-600 м/с соответственно. По результатам исследований скоростной фоторегистрации:

- установлено, что кинетика деформирования труб в сечениях имеет дискретный характер, обусловленный особенностями волновой динамики акустических волн давления с околосвуковой скоростью в средах;

- получены выражения для оценки давления, скорости деформирования и деформации в линейно-акустическом приближении;

- разработана акусто-электроволновая модель деформирования сплавов в цилиндрической симметрии, адекватность модели проверена сопоставлением результатов моделирования кинетики деформирования и профилей деформации с экспериментальными;

- сделана попытка учёта влияния динамической вязкости металлов при деформировании со скоростями до 600 м/с; показано, что при скоростях 100-600 м/с зависимости коэффициента динамической вязкости для алюминия и латуни от изменения скорости не фиксируется;

- разработан алгоритм определения параметров соударения и деформации для электровзрывной сварки труб с трубной решеткой, возможность применения которого подтверждена сопоставлением расчетных и экспериментальных данных;

- сопоставление рассчитанных зон сварки с экспериментальными показали совпадение 30-95%, широкий диапазон совпадений связано с введенными в алгоритм упрощениями.

Установлено, что на профиль деформации и скорость деформирования существенное влияние оказывает волновая динамика. Предложено для управления профилем деформации и скоростью деформирования увеличивать толщину пробки электровзрывного картриджа.

Сформулированы практические рекомендации по регулированию параметров соединения. Рекомендации позволяют оптимизировать технологию соединения и сварки трубчатых деталей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Chebotniagin, L. High-speed deformation of a metal pipe by electric explosion of wires** [Текст] / L. Chebotniagin, V. Potapov // Известия ВУЗов. Физика. - 2012. - Т. 55. - №10-3. С. 47-49.

2. **Чеботнягин, Л.М. Оценка амплитуды импульса давления при электрическом взрыве проводника во взрывном патроне электротехнологических установок** [Текст] / Л.М. Чеботнягин В.В., Потапов // Вестник ИрГТУ. – 2012. - №4(63). - С. 193-199.

3. **Чеботнягин, Л.М. Математическая модель скоростного деформирования металлической трубы электрическим взрывом проводника** [Текст] / Л.М. Чеботнягин, В.В. Потапов, В.П. Колмаков // Вестник ИрГТУ. – 2011. - №2(49). - С. 194-199.

4. **Чеботнягин Л.М. Соединение трубчатых деталей электрическим взрывом проводника: монография** [Текст]: монография / В.П. Колмаков, В.Г. Дмитриев, Л.М. Чеботнягин, К.В. Суслов, В.В. Потапов. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. -152 с.

5. **Электровзрывной способ концевой заделки кабеля и устройство для его осуществления** [Текст]: пат. 2419937 Рос. Федерация: МПК Н 02 G 1/14, Н 01 R 9/11/ Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Дудченко А.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ИрГТУ. - №2010117681/07, заявл. 04.05.2010; опубл. 27.05.2011. – 4 с.: ил..

6. **Чеботнягин, Л.М. Оценка динамической вязкости алюминия и латуни по результатам скоростной фоторегистрации деформирования труб электрическим взрывом проводника** [Текст] / Л.М. Чеботнягин, В.В. Потапов // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр.. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. - Вып. 127: Механика структурно-неоднородных сред. – С.112-116.