УДК 621.791.763.7
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-4-74-4

Особенности регистрации процессов термомеханического воздействия при высоковольтной конденсаторной сварке

Нескоромный Станислав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства»
Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону (Россия)

E-mail: nsneskoromnyi@donstu.ru,
nescoromniy@mail.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0243-7241

Поступила в редакцию 21.04.2025 *Пересмотрена 03.10.2025* *Принята к публикации 07.11.2025*

Аннотация: Применение гибридных технологий позволяет повысить производительность процесса сварки за счет снижения расхода сварочных материалов, временных затрат на подготовку свариваемых кромок, снижения тепловложения, а следовательно, вероятности возникновения трещин. Сварку металлов в разнородном сочетании (медь – алюминий) целесообразно осуществлять импульсными процессами при температурах ниже температуры плавления. В Донском государственном техническом университете разработан процесс высоковольтной конденсаторной сварки, сочетающий процессы электроэрозионной очистки при горении электрической дуги между свариваемыми поверхностями, сближения деталей и выплеска расплавленного металла из зоны сварки с последующей пластической деформацией ювенильных поверхностей. Термосиловое воздействие на свариваемые детали реализуется последовательным включением механизма осадки со свариваемыми деталями в разрядную цепь генератора импульсных токов и не превышает 200 мкс. Параметры разрядного контура (индуктивное и активное сопротивление, емкость) подобраны таким образом, чтобы сварка была осуществлена синусоидальным затухающим разрядом и обеспечивала необходимые энергетические параметры процесса (емкость и напряжение батарей конденсаторов), прочностные параметры сварного соединения. Разработана методика измерения температуры на основе регистрации спектрального излучения при горении дуги, позволяющая оценить термическую составляющую процесса сварки. Расчетным путем определены давления: магнитное, создаваемое механизмом осадки, паров расплавленных металлов и давление соударения. Разработаны методики регистрации температуры и давления в свариваемых деталях при соударении и пластической деформации. Полученные результаты позволяют оценить возможность соединения разнотолщинных деталей в разнородном сочетании из цветных металлов при отработке технологического процесса сварки.

Ключевые слова: конденсаторная сварка; система регистрации; схема процесса; температура; давление; ток разряда; напряжение; индуктор

Для цитирования: Нескоромный С.В. Особенности регистрации процессов термомеханического воздействия при высоковольтной конденсаторной сварке // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 4. С. 51–60. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-4-74-4.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением повышения производительности в области сварочного производства является гибридизация сварочных материалов, источников питания, различных способов сварки. Гибридизация сварочных материалов направлена на использование двух или более присадочных материалов одновременно в зоне сварки, что позволит повысить прочность сварного шва. Целесообразность применения гибридных технологий зависит от марок свариваемых материалов, толщины, разделки кромок, длины сварных швов, склонности к образованию холодных и горячих трещин. Как правило, гибридные методы сварки (лазерно-дуговая, лазерно-плазменная, лазерно-индукционная и др.) формируют сварное соединение в жидкой фазе. В зависимости от сочетаний гибридных методов сварки получается разная ширина зоны термического влияния, сварного шва, что позволяет оценить ресурс работы конструкции в целом [1; 2].

Для получения сварных соединений в разнородном сочетании зачастую применяют импульсные методы сварки: сварку взрывом, магнитно-импульсную сварку (МИС), в которых за счет энергии взрывчатого вещества или магнитного поля разгоняются свариваемые детали и при соударении температура свариваемых поверхностей не превышает $0{,}8T_{пл}$, что позволяет сформировать сварное соединение в твердой фазе.

Авторами [3] проведены исследования оценки прочности сварных соединений с учетом состояния свариваемых поверхностей (механической, химической обработки, нанесения смазочных материалов) с использованием фиксированного зазора и расстояния отступа для сварки. Микроструктурные наблюдения и испытания на растяжение показали, что качество сварки зависит от подготовки поверхности. Образование волнистой микроструктуры и интерметаллических соединений было проверено на границе некоторых соединений. Однако эти условия не гарантировали достаточную прочность [3]. Необходимо обеспечить перед сваркой подготовку поверхностей до ювенильных слоев, а для схватывания ювенильных поверхностей в твердой фазе – соотношение временных параметров процесса (первое условие) [4; 5]:

© Нескоромный С.В., 2025

$$t_в > t_а \geq t_р , \quad (1)$$

где $t_в$, $t_а$, $t_р$ – временные параметры взаимодействия, активации и релаксации свариваемых поверхностей соответственно.

Условие (1) включает энергетические и электрические параметры импульсных процессов, геометрические параметры сборки и параметры индукционно-динамического привода [5; 6]. Время активации зависит от физико-химического состояния поверхностей в момент осуществления физического контакта и величины пластической деформации свариваемых материалов в зоне контакта. Время релаксации зависит от релаксационных характеристик материалов и температуры процесса в зоне сварки. Время взаимодействия (сварки) зависит от технологического приема импульсного процесса и скорости звука в свариваемых сплавах. Так, в работе [7] установлены взаимосвязи прочности для цилиндрических сварных соединений разнородных металлов «алюминий – сталь» в зависимости от скорости и угла столкновения, радиального зазора, длины нахлесточного соединения и напряжения разряда батарей конденсаторов. Определены соотношения между радиальным зазором и напряжением, что позволяет получать сварные соединения при меньшей вводимой энергии.

Как правило, $t_в$ не превышает несколько сотен микросекунд, а давление достигает 10^7 Па. Такими показателями характеризуется высоковольтная конденсаторная сварка (ВКС), разработанная в Донском государственном техническом университете. Гибридная технология ВКС сочетает в себе процессы горения импульсной дуги аналогично стыковой сварке оплавлением и сварку ковкой при соударении разогретых поверхностей за счет магнитного поля, создаваемого в индукторе, который входит в разрядную цепь источника питания (генератора импульсных токов) и свариваемых деталей.

Для снижения экономических и временных затрат на проведение экспериментальной части исследований в настоящее время разработаны программные продукты ANSYS, MARC, SPOTSIM, SYSWELD, BAZIS, LS-DYNA и другие, позволяющие проанализировать составляющие сварки взрывом, магнитно-импульсной сварки: тепловые процессы, деформации, напряжения. К сожалению, в предлагаемых продуктах представлены только наиболее распространенные методы сварки для моделирования протекающих процессов. Однако нынешний вектор развития в сварочном производстве направлен на исследование и внедрение гибридных методов сварки, смоделировать которые проблематично в силу множества одновременно меняющихся факторов.

Используемые методы моделирования менее распространенных способов сварки (рельефной, конденсаторной) в основном представлены узкоспециализированными программами на уровне диссертационных работ [8; 9]. С учетом специфики процесса ВКС ни один из разработанных программных продуктов не позволяет смоделировать импульсный процесс ВКС. Вначале необходимо провести натурный эксперимент с временным сопоставлением всех процессов термомеханического воздействия.

Процесс ВКС реализуется по схеме, приведенной на рис. 1. Установка для ВКС состоит из:

– генератора импульсных токов (ГИТ), в состав которого входят: блок зарядный (трансформатор повышающий, выпрямитель, управляемый мостовой), накопительное устройство (батарея конденсаторов), блок коммутирующий (коммутирующее управляющее искровое устройство разрядника с блоком поджига);

– магнитного механизма осадки, состоящего из плоского индуктора (включает в себя диэлектрический бандаж, в который укладывается плоская спираль Архимеда), стального толкателя с дюралюминиевой подложкой, механизма крепления привариваемого стержневого элемента с токоподводящей клеммой.

Благодаря последовательному соединению батарей конденсаторов с индуктором и свариваемыми деталями реализовано синхронное термосиловое воздействие на зону свариваемых деталей. Более подробное описание физической сущности процесса представлено в работе [10]. Выявлены 4 стадии процесса ВКС, включающие: 1) пробой межэлектродного промежутка (при наличии предварительного зазора между деталями), 2) возбуждение дуги, 3) электроэрозионную очистку, 4) сближение деталей и выплеск расплавленного металла из зоны сварки с последующей пластической деформацией ювенильных поверхностей. Достоверность разработанных стадий процесса установлена на основании применения современной регистрирующей аппаратуры, включающей скоростную фоторегистрацию процесса термодинамического воздействия на свариваемые детали (камера CORDIN 505). Кинетика движения толкателя в магнитном поле индукционно-динамического привода исследована скоростной камерой Phantom.

Все стадии процесса (1–4) протекают в течение первого периода разряда тока (второе условие):

$$t_{раз} + t_{гд} + t_в \leq (0{,}75 \div 1)T , \quad (2)$$

где $t_{раз}$ – время разогрева и испарения приповерхностных слоев поверхностей свариваемых деталей;
$t_{гд}$ – время горения импульсной дуги (электроэрозионная очистка);
$t_в$ – время твердофазного взаимодействия (сварки);
T – период разряда емкостного накопителя на катушку индуктора и свариваемые детали.

Авторами [11] были получены осциллограммы процесса МИС: ток разряда и магнитное давление, по которым рассчитывалось изменение в процессе сварки параметров разрядного контура R, L и C, которые позволят спрогнозировать формы импульсов тока для используемых индукторов. В основной серии экспериментов при ВКС параметры разрядного контура R, L и C были выбраны таким образом, чтобы ток был синусоидальный затухающий и выполнялось условие:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} ,$$

где R – активное сопротивление разрядного контура;
L – индуктивное сопротивление разрядного контура;
C – емкость батарей конденсаторов.

В [12] произведена оптимизация процесса МИС, состоящая из определения по величине выплеска расплавленного металла величины минимальной вводимой энергии при минимальном расстоянии между свариваемыми деталями и необходимом угле их соударения, что позволяет увеличить срок службы индуктора. Регистрацию тока

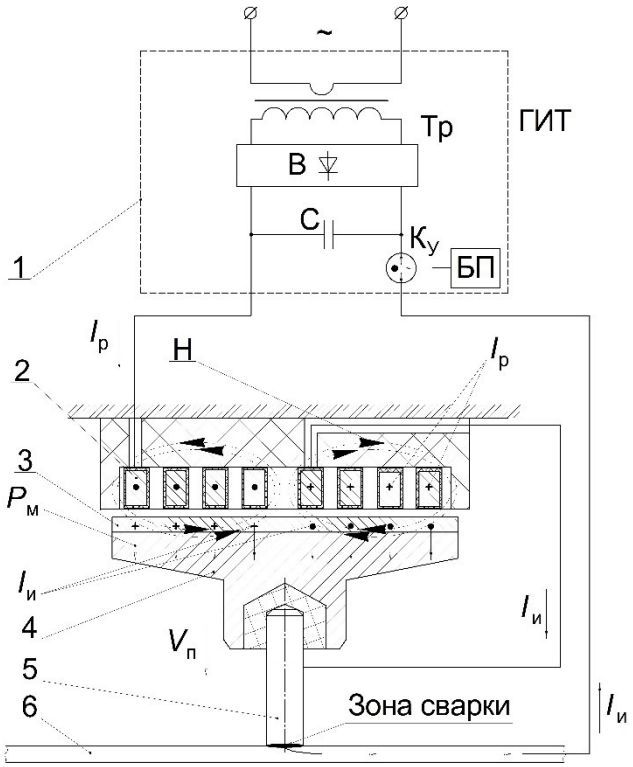


Рис. 1. *Принципиальная схема установки для высоковольтной конденсаторной сварки (ВКС):*
1 – генератор импульсных токов (ГИТ); 2 – индуктор; 3 – дюралюминиевая подложка; 4 – стальной толкатель;
5 – привариваемый стержневой элемент с токоподводящей клеммой и механизмом крепления;
6 – свариваемая деталь; Н – магнитный поток, создаваемый катушкой индуктора;
$P_м$ – магнитное давление в рабочей зоне индуктора; $I_р$ – ток разряда;
$I_и$ – наведенный индуцированный ток; $V_п$ – скорость перемещения толкателя
Fig. 1. *Schematic diagram of the high-voltage capacitor welding (HCW) setup:*
1 – pulse current generator (PCG); 2 – inductor; 3 – duralumin substrate; 4 – steel pusher;
5 – welded rod element with current-carrying terminal and fastening mechanism; 6 – workpiece to be welded;
H – magnetic flux generated by the inductor coil; $P_м$ – magnetic pressure in the inductor working zone;
$I_р$ – discharge current; $I_и$ – induced current; $V_п$ – pusher displacement velocity

разряда и напряжения в процессе ВКС осуществляли с использованием цифрового осциллографа, который подключали к короткозамкнутому витку – поясу Роговского и делителю напряжения. Сопоставляя время протекания тока, его амплитуду с результатами скоростной фоторегистрации, возможно определить длительность существования отдельных стадий и их вклад в получение неразъемного соединения.

Магнитное давление $P_м$ при ВКС, сближающее свариваемые детали, определяется по выражению

$$P_м = к_2 \frac{U^2 C}{L} \cdot e^{\frac{r_a t}{L}} \cdot \sin^2 \omega t, \qquad (3)$$

где $к_2$ – коэффициент, учитывающий соотношение геометрических параметров «индуктор – свариваемые детали»;
U – напряжение заряда батарей конденсаторов;
C – емкость батарей конденсаторов;
L, $r_а$ – индуктивность и активное сопротивление разрядного контура соответственно;
ω – круговая частота тока;
t – время.

Магнитному давлению $P_м$ противодействует давление паров расплавленных металлов ($P_{пм}$), определяемое по эмпирическому выражению [10]:

$$P_{пм} = \frac{28 I_р^2}{r_{им} S}, \qquad (4)$$

где $I_р$ – ток разряда;
$r_{им}$ – теплота испарения металла;
S – площадь контактной поверхности сварного соединения.

Несмотря на всестороннюю изученность процесса благодаря использованию современной регистрирующей аппаратуры, представляется интересной регистрация температуры при горении дуги и после ее гашения, а также регистрация давления на стадии пластической деформации и твердофазного взаимодействия. Регистрация спектрального излучения для определения температуры в зоне сварки была осуществлена методом двухцветной пирометрии. Осуществляли регистрацию величины оптического излучения при горении электрической дуги и далее сравнивали с планковским излучением черного тела [13]. В [14] показано, что погрешность данного метода

составила 2 % для смещения температуры и 3–8 % для амплитуды колебаний температуры при нагреве исследуемых образцов. Авторы [15] использовали метод двухцветной пирометрии для термоструктурных экспериментов в средах теплового излучения с последующим анализом термоструктурных напряжений. Полученные результаты позволили устранить эффекты отражений фонового излучения и неизвестных коэффициентов излучения на основе алгоритма наименьших квадратов.

Анализ литературных данных аналогичных импульсных процессов показал, что основным датчиком для регистрации температуры, давления являются термопары типа Fe–Ni, Cu–Ni, Cu–константан, позволяющие зафиксировать термо-ЭДС в микросекундном диапазоне [16]. К физическим параметрам, определяющим состояние металлов в зоне соударения, а следовательно, и процесс их схватывания, относят давление и температуру, которые обуславливают пластическую деформацию свариваемых деталей. Так, при сварке взрывом термопары размещают в углублениях нижней свариваемой плиты. При соударении металл в зоне контакта с термопарой пластически деформируется, на осциллографе регистрируется сигнал в виде термо-ЭДС. Более подробное описание измерений при сварке взрывом, магнитно-импульсной сварке, стыковой сварке сопротивлением и оплавлением с использованием термопар представлено в работе [17]. При ВКС особая сложность заключается в расположении термопар, к тому же внешние магнитные поля усложняют получение качественного сигнала [18].

Цель работы – создание системы регистрации параметров режимов высоковольтной конденсаторной сварки на стадии горения электрической дуги, пластической деформации и твердофазного взаимодействия.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые сплавы

Для сварки применяли стержневые элементы из сплава М1 (ГОСТ 1535-2006) диаметром 10 мм с выступом на торце (диаметр/длина d/l=1,3/1,5 мм), листы из сплава А5М (ГОСТ 21631-2019) толщиной 2 мм.

Оборудование и приборы

Регистрацию тока разряда, времени его протекания осуществляли поясом Роговского, напряжение на дуге – делителем напряжения. Температуру определяли по интенсивности оптического излучения. ВКС осуществляли на обратной полярности (стержень «+», пластина «–») и на прямой полярности.

Для обеспечения синусоидального затухающего тока были установлены следующие параметры разрядного контура: индуктивность разрядного контура L=1800–2100 нГн, емкость батарей конденсаторов C=1800 мкФ, что соответствовало R<68 мкОм. Параметры режимов ВКС приведены в таблице 1.

ВКС осуществляли на установке «Импульс – БМ» (Россия) энергоемкостью до 30 кДж и собственной частотой 20 кГц. Осциллографирование параметров импульсного процесса выполняли с помощью цифрового запоминающего осциллографа марки АКИП 4126/1А (Россия).

Методика регистрации температуры

Регистрацию излучения при горении дуги осуществляли методом двухцветной пирометрии по следующей схеме (рис. 2). Измерительная система состояла из системы обработки информации (цифровой запоминающий осциллограф АКИП 4126/1А), фотодиода

Таблица 1. *Параметры режимов ВКС*
Table 1. *Parameters of HCW modes*

Наименование параметра	Напряжение заряда батарей конденсаторов U, В	Емкость батарей конденсаторов C, мкФ	Вводимая энергия W, Дж
Значение	1800–2400	1800	2900–5180

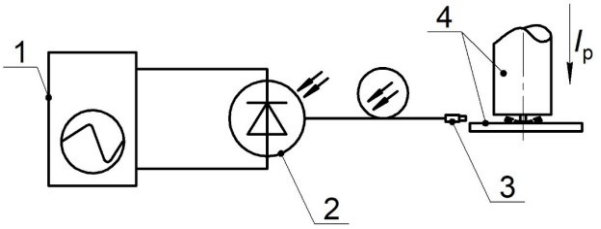


Рис. 2. *Схема системы регистрации оптического излучения процесса ВКС:*
1 – система обработки информации (цифровой запоминающий осциллограф АКИП 4126/1А);
2 – фотодиод; 3 – оптическое волокно; 4 – свариваемые детали
Fig. 2. *Schematic diagram of the optical radiation recording system for the HCW process:*
1 – information processing system (AKIP-4126/1A digital storage oscilloscope);
2 – photodiode; 3 – optical fiber; 4 – parts to be welded

(фотоэлектронный умножитель ФЭУ-175М (Россия), который соединяли с оптическим волокном (световод марки ГВОЖ диаметром 5 мм), торец которого располагали на расстоянии 30÷50 мм от зоны сварки и свариваемых деталей.

Методика расчета давления на стадии пластической деформации и твердофазного взаимодействия свариваемых деталей

При ВКС выделяли несколько давлений. $P_м$ – магнитное давление, создаваемое в рабочей зоне индуктора и воздействующее на одну из свариваемых деталей. Его определяли расчетным путем по формуле (3).

При горении дуги возникают пары расплавленного металла, которые противодействуют магнитному давлению, а также участвуют в вытеснении ванны жидкого металла из зоны сварки. Оценку величины давления паров расплавленного металла $P_{пм}$ определяли по эмпирической формуле (4). При сварке разнородных сплавов учитывали $r_{им}$ сплава с наименьшей температурой плавления.

При соударении свариваемых поверхностей учитывали давление сжатия ювенильных поверхностей. Авторы работы [19] установили, что в условиях высокотемпературного удара инерционные члены в уравнениях сплошной среды превышают прочностные и металл в расчетах рассматривается как идеальная жидкость. Так как вследствие упругой деформации при соударении свариваемых деталей давление снижается, то были предложены поправочные коэффициенты, учитывающие теплофизические свойства свариваемых материалов [20]:

$$P_{сд} = \left(1 + \frac{\rho_{ст} C_{ст}}{\rho_л C_л}\right)^{-1} \rho_{ст} C_{ст} V_{ст}, \quad (5)$$

где $P_{сд}$ – давление соударения;
$\rho_{ст}$, $C_{ст}$, $V_{ст}$ – плотность, скорость распространения упругой волны сжатия и скорость стержня соответственно;
$\rho_л$ $C_л$ – плотность, скорость распространения упругой волны сжатия в листе соответственно.

Скорость соударения свариваемых деталей ($V_{сд}$) определяли из 2-го закона Ньютона:

$$V_{сд} = \frac{F_м t}{m_т}, \quad (6)$$

где $F_м$ – сила магнитного давления;
t – время процесса ВКС;
$m_т$ – масса толкателя со свариваемой деталью.

Длительность действия давления соударения свариваемых деталей $P_{сд}$ ($t_{сд}$) оценивали по формуле [20]:

$$t_{сд} = \frac{2\, l_{ст}}{C_л}, \quad (7)$$

где $l_{ст}$ – длина стержневого элемента.

Волна соударения проходит в направлении $P_м$ и в обратном направлении с учетом скорости распространения упругой волны сжатия в листе $C_л$.

Напряжение отраженной волны $\sigma_{отр}$, воспринимаемое границей раздела после соударения свариваемых деталей, равно возмущающему давлению:

$$\sigma_{отр} \approx P_{сд}. \quad (8)$$

При этом, если $\sigma_{отр} > P_{сд}$, то металлические связи будут разрушены и сварное соединение не сформировано.

Методика регистрации температуры и давления при соударении свариваемых деталей

Система регистрации температуры после гашения дуги и давления (рис. 3) состояла из термопар типа К (хромель – алюмель), так как они характеризуются наименьшей инерционностью. Термопары подключали к аналоговому усилителю и системе обработки информации. Для снижения помех и усиления сигнала импульсного процесса использовали усилитель AD8495. Установку термопары К-типа осуществляли на расстоянии 3 мм от зоны сварки в глухое отверстие свариваемого стержня. Установку нижней термопары осуществляли в диэлектрической подложке с профрезерованным пазом под спай. Сверху укладывали свариваемый лист, поджимали индуктором с толкателем через стержень [17; 18].

Принцип работы усилителя AD8495 для термопары К-типа заключался в формировании на выходе сигнала по напряжению U пропорционально температуре с разрешением 5 мВ/°С. Через измеренное напряжение на выходе датчика была определена температура по уравнению

$$T_{изм} = \frac{U - 1{,}25}{0{,}005} + 273{,}13, \quad (9)$$

где $T_{изм}$ – измеренная температура, К;
U – сигнал термопары, В.

С помощью систем регистрации ВКС (рис. 2 и 3) было получено распределение параметров процесса на этапах 3 и 4 (рис. 4).

Для подтверждения регистрации именно давления соударения $P_{сд}$ термопарой, а не температуры процесса нагрева пластины были поставлены дополнительные эксперименты. Соударение осуществляли магнитным механизмом осадки, без подключения деталей в разрядный контур «Импульс – БМ». Термопару располагали под пластиной. В результате были зафиксированы изменения сигнала от термопары, аналогичные по длительности процесса, но разные по амплитуде по сравнению с основной серией экспериментов, так как нет затрат энергии на нагрев зоны соединения электрической дугой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Осциллограммы распределения тока разряда, напряжения в разрядной цепи и температуры процесса при горении электрической дуги приведены на рис. 4. Форма тока $I_р$ характеризуется синусоидальным затухающим разрядом с амплитудой в первой полуволне 32 кА при времени 100 мкс. Период разряда тока T=180–200 мкс, что соответствует индуктивности разрядной цепи 1800 и 2100 нГн соответственно. Напряжение U характеризуется амплитудным значением 2400 В, что соответствует напряжению заряда батарей конденсаторов. В диапазоне 0–20 мкс наблюдается спад напряжения в виде ступеньки. Далее форма напряжения имеет вид синусоидального затухающего разряда. При амплитудном значении напряжения 2400 В и времени 0–5 мкс ток разряда равен нулю.

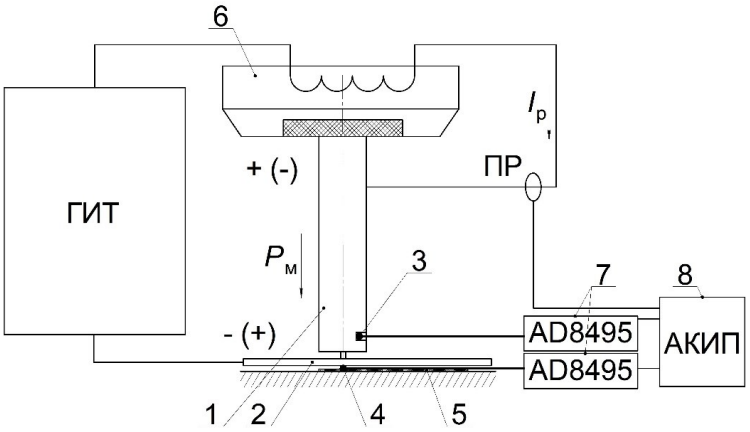


Рис. 3. *Схема системы для измерения температуры и давления при соударении:*
1, 2 – свариваемые стержень и лист; 3, 4 – термопары типа К (хромель – алюмель)
для измерения температуры и давления; 5 – диэлектрическая подложка;
6 – индуктор с толкателем; 7 – аналоговый усилитель AD8495; 8 – осциллограф
Fig. 3. *Schematic illustration of the temperature and pressure measurement system during impact:*
1, 2 – rod and sheet to be welded; 3, 4 – type K thermocouples (chromel – alumel)
for temperature and pressure measurement; 5 – dielectric substrate;
6 – inductor with pusher; 7 – AD8495 analogue amplifier; 8 – oscilloscope

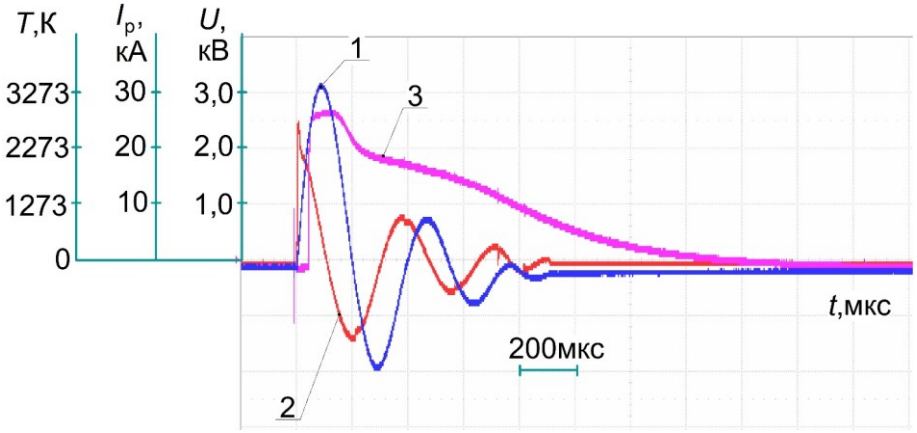


Рис. 4. *Осциллограммы распределения параметров процесса ВКС:*
1 – ток разряда ($I_р$); 2 – напряжение в разрядной цепи (U);
3 – температура процесса при горении дуги (T)
Fig. 4. *Oscillograms of distribution of HCW process parameters:*
1 – discharge current ($I_р$); 2 – voltage in discharge circuit (U);
3 – process temperature during arc combustion (T)

При переходе напряжения через ноль ток разряда достигает своего амплитудного значения. При переходе тока разряда через ноль напряжение находится в амплитудном значении 1400 В при времени процесса 200 мкс. Температура процесса *T* начиная с момента времени 20 мкс имеет скачок до своего амплитудного значения 2873 К, остается постоянной в течение 60–70 мкс. Начиная с 110 мкс наблюдается резкий спад, после 200 мкс – плавное снижение температуры процесса до нуля в точке 1500 мкс. Значения зарегистрированных параметров процесса ВКС приведены в таблице 2.

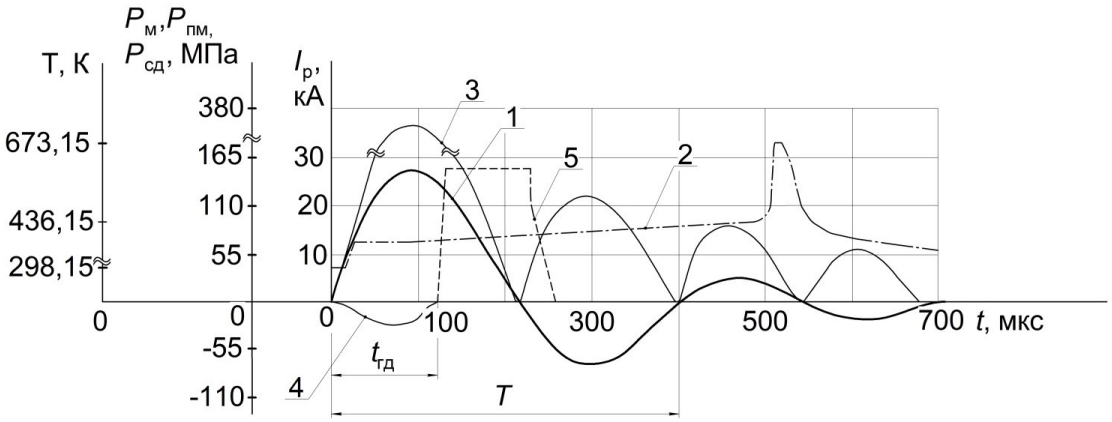
При ВКС на обратной полярности (рис. 5 a) магнитное давление характеризуется апериодическим колебательным затухающим синусоидальным разрядом в положительной полуволне. Амплитуда первой волны магнитного давления 378 МПа имеет длительность 200 мкс.

Температура процесса при длительности 0–20 мкс соответствует температуре *T*=298,15 К, с 20–490 мкс возрастает до *T*=436,15 К, далее резкий скачок до амплитудного значения *T*=673,15 К длительностью 40 мкс и спад до *T*=298,15 К. Давление паров металла представляет собой апериодический затухающий вид длительностью 120 мкс с амплитудным значением 22 МПа. Давление соударения в амплитудном значении составляет $P_{сд}$=158 МПа и соответствует $\sigma_{отр}$≈158 МПа длительностью 110 мкс.

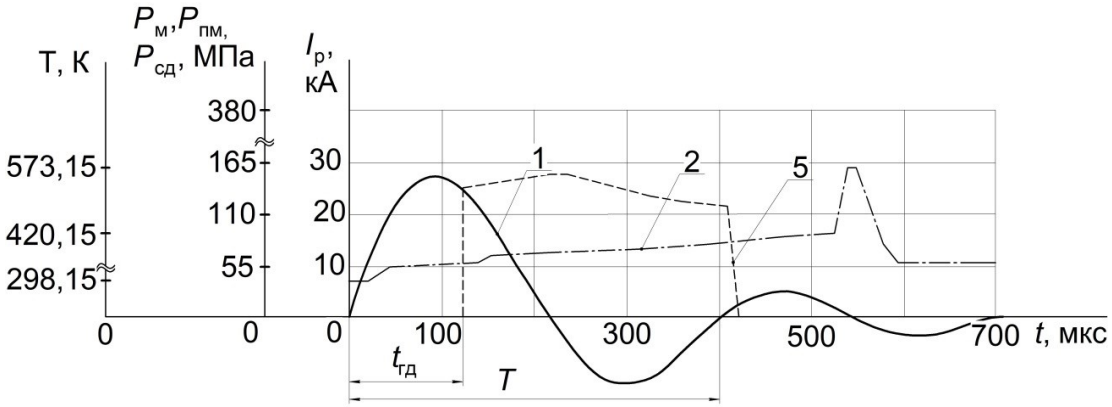
При ВКС на прямой полярности (рис. 5 b) магнитное давление по амплитудным и временным параметрам

Таблица 2. *Регистрируемые параметры режимов ВКС*
Table 2. *Recorded parameters of HCW modes*

Напряжение заряда батарей конденсаторов *U*, В	Ток разряда $I_р$, кА	Температура *T*, К	
		Полярность обратная	Полярность прямая
1800	28,0	2973±373	3073±373
2100	35,0	2873±373	2823±373
2400	38,6	2873±373	3023±373



a



b

Рис. 5. *Осциллограммы параметров процесса ВКС при разной полярности тока:*
a *– обратная;* ***b*** *– прямая.*
1 – ток разряда ($I_р$); 2 – температура процесса (T);
3 – магнитное давление ($P_м$); 4 – давление паров металла ($P_{пм}$);
5 – давление соударения ($P_{сд}$); $t_{гд}$ – время горения дуги
Fig. 5. *Oscillograms of HCW process parameters at different current polarities:*
a *– reverse;* ***b*** *– direct.*
1 – discharge current ($I_р$); 2 – process temperature (T);
3 – magnetic pressure ($P_м$); 4 – metal vapor pressure ($P_{пм}$);
5 – impact pressure ($P_{сд}$); $t_{гд}$ – arc burning duration

аналогично ВКС на обратной полярности (на рис. 5 b не показано). Температура процесса характеризуется скачкообразным увеличением длительностей в диапазоне 20–44 мкс; 135–150 мкс и с 525 мкс соответствуют температуре T=420,15 мкс. Амплитудное значение давления соударения равно 158 МПа в точке 230 мкс, далее с 230–410 мкс – спад до 120 МПа. В точке 420 мкс давление равно нулю.

В результате расчетов после подстановки численных значений в формулы (3), (4), (5) получили следующие значения давлений при ВКС: $P_м$=378 МПа, $P_{пм}$=22 МПа, $P_{сд}$=158 МПа. Согласно расчетам по формулам (6), (7), (8) время $t_{сд}$=24 мкс при скорости $V_{сд}$=15,5 м/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ осциллограммы процесса ВКС рис. 3 показал следующее. Спад напряжения (рис. 3, поз. 2) с момента t>0 свидетельствует о снижении сопротивления в зоне контакта свариваемых деталей. Ток разряда I_p по закону Ома возрастает, увеличивается и температура процесса T (рис. 3, поз. 3), горит электрическая дуга, реализуется процесс электроэрозионной очистки свариваемых поверхностей. При переходе тока разряда через «0» крутизна спада температуры T снижается на (0,5÷0,75)T (здесь T – период процесса), что свидетельствует о замыкании дугового промежутка и начале процесса соударения со скоростью $V_{сд}$, длительностью $t_{сд}$.

Аналогичные формы импульсов тока разряда, температуры процесса разной амплитуды и длительности процесса были получены другими исследователями [12; 21]. Основное отличие состоит в амплитудных значения формы импульсов, так как в исследованиях этих ученых осуществляют сварку алюминия со сталью на энергиях, в 1,5 раза больших (5,1–6,3 кДж). Ток разряда 326–338 кА на порядок выше процесса ВКС, так как для МИС применяется высокочастотная установка. Длительность процесса МИС составляет 190 мкс, что в 1,7 раза больше, чем при ВКС. Это обусловлено большим исходным зазором между свариваемыми деталями (2 мм при МИС и 1,5 мм при ВКС). В работе [11] осуществлена регистрация тока разряда и напряжения, которые отличаются только по амплитуде и длительности, так как использовали накопители энергии емкостью 148 мкФ (при ВКС – 1800 мкФ).

Давление соударения $P_{сд}$ (рис. 5 a, b, поз. 5) одинаковое по амплитуде независимо от полярности тока, так как зависит от свойств свариваемых материалов и режимов сварки, формула (5). По длительности воздействия время соударения на прямой полярности $t_{сдпр}$ в 2,2 раза превышает время соударения на обратной полярности $t_{сдобр}$. Это связано с тем, что сплав А5М является анодом (температура нагрева выше) и более пластичен по сравнению со сплавом М1 (HV_{Al}=30 МПа, HV_{Cu}=95 МПа), поэтому сильнее происходят процессы его деформации.

При ВКС на обратной полярности температура процесса T (рис. 5 a, поз. 2) выше, чем на прямой. Это объясняется разным тепловложением и разными теплофизическими свойствами свариваемых сплавов (теплопроводность λ_{Al}=209,3 Вт/м×К, λ_{Cu}=389,6 Вт/м×К). Так, при обратной полярности («+» на стержне) выделяется больше теплоты на стержне из сплава М1.

Научная новизна работы состоит в установлении взаимосвязи параметров процесса нагрева, сближения, пластической деформации и твердофазного взаимодействия на всех стадиях процесса ВКС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана система согласующих устройств импульсного процесса для регистрации температуры методом двухцветной пирометрии при горении дуги в микросекундном диапазоне длительностей.

Предложена методика расчета давлений на стадии пластической деформации и твердофазного взаимодействия свариваемых деталей, учитывающая теплофизические свойства свариваемых матералов, скорость звука и перемещения свариваемой детали определенной массы.

Разработана система регистрации температуры после гашения дуги и давления при соударении и пластической деформации свариваемых поверхностей.

Полученные результаты позволяют оценивать возможность сварки металлов с учетом их теплофизических свойств, свариваемых толщин, а также расширяют возможности изучения высокоскоростных процессов пластической деформации и твердофазного взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul A.R., Mukherjee M. Hybrid Welding Technologies // Advanced Joining Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2024. P. 152–168. DOI: 10.1201/9781003327769-9.
2. Bernadskiy V.N. Hybrid welding technologies and welded joints // Welding International. 2014. Vol. 28. № 8. P. 654–659. DOI: 10.1080/09507116.2013.849407.
3. Emadinia O., Ramalho A.M., Oliveira I.V., Taber G., Reis A. Influence of Surface Preparation on the Interface of Al-Cu Joints Produced by Magnetic Pulse Welding // Metals. 2020. Vol. 10. № 8. Article number 997. DOI: 10.3390/met10080997.
4. Marre M., Weddeling C., Hammers T., Merzkirch M., Rautenberg J., Tekkaya A., Schulze V., Biermann D., Zabel A. Innovative joining methods in lightweight designs, Part II // Aluminium, International Journal for Industry, Research and Application. 2010. Vol. 3. P. 55–59.
5. Нескоромный С.В., Панов Ю.В. Методика расчета параметров процесса и выбора оборудования для высоковольтной конденсаторной сварки // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2018. № 1. С. 52–59. DOI: 10.18323/2073-5073-2018-1-52-59.
6. Анисимов А.Г., Ахмед Солиман М.Э. Экспериментальное исследование и численное моделирование метания алюминиевого образца для магнитно-импульсной сварки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 3. С. 1–11. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2160.
7. Yu Haiping, Dang Haiqing, Qiu Yanan, Zhang Wenzhong. Effects of key parameters on magnetic pulse welding of 5A02 tube and SS304 tube // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 110. P. 2529–2540. DOI: 10.1007/s00170-020-06039-6.
8. Поляков А.Ю., Фурманов С.М., Федотов Б.В., Юманов Д.Н., Колобова М.С. Экспериментальное определение энергетических параметров процесса контактной рельефной сварки // Вестник Белорусско-

российского университета. 2017. № 1. С. 74–83. DOI: 10.53078/20778481_2017_1_74.
9. Юманов Д.Н., Фурманов С.М., Юманова А.Н. Методика определения критерия образования качественных Т-образных соединений при контактной рельефной сварке с помощью математического моделирования // Наука и техника. 2025. Т. 24. № 1. С. 24–32. DOI: 10.21122/2227-1031-2025-24-1-24-32.
10. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Людмирский Ю.Г., Мордовцев Н.А. Методы магнитно-импульсной сварки (обзор) // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 2. С. 70–77. DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-70-77.
11. Li Chengxiang, Zhou Yan, Shi Xin, Liao Zhigang, Du Jian, Shen Ting, Yao Chenguo. Magnetic field edge-effect affecting joint macro-morphology in sheet electromagnetic pulse welding // Materials and Manufacturing Processes. 2020. Vol. 35. № 9. P. 1040–1050. DOI: 10.1080/10426914.2020.1758332.
12. Bellmann J., Lueg-Althoff J., Schulze S., Gies S., Beyer E., Tekkaya A.E. Parameter Identification for Magnetic Pulse Welding Applications // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 767. P. 431–438. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.767.431.
13. Минько Д.В., Кузнечик О.О. Фотоэмиссионный метод измерения температуры в процессе электроимпульсного спекания порошков тугоплавких металлов // Приборы и методы измерений. 2012. № 1. С. 92–98. EDN: TOUZHJ.
14. Bennett T.D., Silveira V.B., Valdes R. Two-color pyrometry for low amplitude periodic heating // Review of Scientific Instruments. 2017. Vol. 88. № 2. Article number 024903. DOI: 10.1063/1.4975927.
15. Fu Tairan, Liu Jiangfan, Duan Minghao, Zong Anzhou. Temperature measurements using multicolor pyrometry in thermal radiation heating environments // Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85. № 4. Article number 044901. DOI: 10.1063/1.4870252.
16. Долиненко В.В., Скуба Т.Г., Ващенко О.Ю., Луценко Н.Ф. Многоканальный микропроцессорный контроллер сбора данных с термопар // Автоматическая сварка. 2012. № 11. С. 50–52. EDN: TETNZJ.
17. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005. 544 с.
18. Webster E. A critical review of the common thermocouple reference functions // Metrologia. 2021. Vol. 58. № 2. Article number 025004. DOI: 10.1088/1681-7575/abdd9a.
19. Александров Л.Н., Орлов В.Н. Релаксационные явления в металлах и сплавах. М.: Металлургиздат, 1963. 311 с.
20. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 263 с.
21. Bellmann J., Schettler S., Schulze S., Wagner M., Standfuss J., Zimmermann M., Beyer E., Leyens Ch. Improving and monitoring the magnetic pulse welding process between dissimilar metals // Welding World. 2021. Vol. 65. P. 199–209. DOI: 10.1007/s40194-020-01009-8.

REFERENCES

1. Paul A.R., Mukherjee M. Hybrid Welding Technologies. *Advanced Joining Technologies*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2024, pp. 152–168. DOI: 10.1201/9781003327769-9.
2. Bernadskiy V.N. Hybrid welding technologies and welded joints. *Welding International*, 2014, vol. 28, no. 8, pp. 654–659. DOI: 10.1080/09507116.2013.849407.
3. Emadinia O., Ramalho A.M., Oliveira I.V., Taber G., Reis A. Influence of Surface Preparation on the Interface of Al-Cu Joints Produced by Magnetic Pulse Welding. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 8, article number 997. DOI: 10.3390/met10080997.
4. Marre M., Weddeling C., Hammers T., Merzkirch M., Rautenberg J., Tekkaya A., Schulze V., Biermann D., Zabel A. Innovative joining methods in lightweight designs, Part II. *Aluminium, International Journal for Industry, Research and Application*, 2010, vol. 3, pp. 55–59.
5. Neskoromnyy S.V., Panov Yu.V. The technique of calculating the parameters of the process and selection of equipment for high-voltage condenser welding. *Science Vector of Togliatti State University*, 2018, no. 1, pp. 52–59. DOI: 10.18323/2073-5073-2018-1-52-59.
6. Anisimov A.G., Akhmed Soliman M.E. Experimental investigation and numerical simulation of accelerating an aluminium sample for magnetic pulse welding. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, no. 3, pp. 1–11. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2160.
7. Yu Haiping, Dang Haiqing, Qiu Yanan, Zhang Wenzhong. Effects of key parameters on magnetic pulse welding of 5A02 tube and SS304 tube. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 110, pp. 2529–2540. DOI: 10.1007/s00170-020-06039-6.
8. Polyakov A.Yu., Furmanov S.M., Fedotov B.V., Yumanov D.N., Kolobova M.S. Experimental determination of energy parameters of projection welding. *Vestnik Belorussko-rossiyskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 74–83. DOI: 10.53078/20778481_2017_1_74.
9. Yumanov D.N., Furmanov S.M., Yumanova A.N. Methodology for determining the criterion for the high-quality formation of T-shaped joints by resistance projection welding using mathematical modeling. *Science and Technique*, 2025, vol. 24, no. 1, pp. 24–32. DOI: 10.21122/2227-1031-2025-24-1-24-32.
10. Strizhakov E.L., Neskoromnyy S.V., Lyudmirskiy Yu.G., Mordovtsev N.A. Methods of magnetic pulse welding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2024, no. 2, pp. 70–77. DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-70-77.
11. Li Chengxiang, Zhou Yan, Shi Xin, Liao Zhigang, Du Jian, Shen Ting, Yao Chenguo. Magnetic field edge-effect affecting joint macro-morphology in sheet electromagnetic pulse welding. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35, no. 9, pp. 1040–1050. DOI: 10.1080/10426914.2020.1758332.
12. Bellmann J., Lueg-Althoff J., Schulze S., Gies S., Beyer E., Tekkaya A.E. Parameter Identification for Magnetic Pulse Welding Applications. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 767, pp. 431–438. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.767.431.
13. Minko D.V., Kuznechik O.O. Photoemission method of temperature measuring in the process of spark plasma sintering powders of refractory metals. *Devices and Methods of Measurements*, 2012, no. 1, pp. 92–98. EDN: TOUZHJ.
14. Bennett T.D., Silveira V.B., Valdes R. Two-color pyrometry for low amplitude periodic heating. *Review*

of Scientific Instruments, 2017, vol. 88, no. 2, article number 024903. DOI: 10.1063/1.4975927.
15. Fu Tairan, Liu Jiangfan, Duan Minghao, Zong Anzhou. Temperature measurements using multicolor pyrometry in thermal radiation heating environments. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 4, article number 044901. DOI: 10.1063/1.4870252.
16. Dolinenko V.V., Skuba T.G., Vashchenko O.Yu., Lutsenko N.F. Multichannel microprocessor controller for data collection from thermocouples. *The Paton Welding Journal*, 2012, no. 11, pp. 50–52. EDN: TETNZJ.
17. Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Svarka vzryvom* [Explosive welding]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2005. 544 p.
18. Webster E. A critical review of the common thermocouple reference functions. *Metrologia*, 2021, vol. 58, no. 2, article number 025004. DOI: 10.1088/1681-7575/abdd9a.
19. Aleksandrov L.N., Orlov V.N. *Relaksatsionnye yavleniya v metallakh i splavakh* [Relaxation phenomena in metals and alloys]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963. 311 p.
20. Karakozov E.S. *Soedinenie metallov v tverdoy faze* [Metal joining in solid phase]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 263 p.
21. Bellmann J., Schettler S., Schulze S., Wagner M., Standfuss J., Zimmermann M., Beyer E., Leyens Ch. Improving and monitoring the magnetic pulse welding process between dissimilar metals. *Welding World*, 2021, vol. 65, pp. 199–209. DOI: 10.1007/s40194-020-01009-8.

УДК 621.791.763.7
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-4-74-4

Special aspects of recording thermomechanical impact processes during high-voltage capacitor discharge welding

Stanislav V. Nescoromniy, PhD (Engineering), Associate Professor,
Head of Chair of Machinery and Automation in Welding Production
Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

E-mail: nsneskoromnyi@donstu.ru,
nescoromniy@mail.ru

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0243-7241

Received 21.04.2025 *Revised 03.10.2025* *Accepted 07.11.2025*

Abstract: The application of hybrid technologies allows improving welding productivity by reducing welding material consumption, edge preparation time, heat input, and, consequently, the probability of crack formation. Welding of dissimilar metal combinations (copper – aluminum) is best performed using pulsed processes at temperatures below the melting point. A high-voltage capacitor welding process has been developed at Don State Technical University. This process combines several stages: electroerosive cleaning during the burning of an electric arc between the weld surfaces, the convergence of the parts, and the splashing of molten metal from the weld zone followed by plastic deformation of the juvenile surfaces. Thermal force impact on the welded parts is implemented by connecting sequentially the upset mechanism together with the welded parts into the discharge circuit of a pulse current generator, with the total duration not exceeding 200 μs. The discharge circuit parameters (inductive and active resistance, capacitance) were selected to enable welding by means of a damped sinusoidal discharge and to ensure the necessary process energy parameters (capacitor bank capacitance and voltage) and the strength characteristics of the welded joint. A temperature measurement technique based on recording spectral radiation during arcing was developed, which allows evaluating the thermal component of the welding process. Following pressures were calculated: magnetic pressure, pressure generated by the upset mechanism, pressure of molten metal vapor, and impact pressure. Methods for recording the temperature and pressure in the welded parts during impact and plastic deformation were developed. The obtained results allow evaluating the feasibility of joining parts of different thicknesses and heterogeneous combinations of non-ferrous metals during the development of the welding process.

Keywords: capacitor discharge welding; recording system; process diagram; temperature; pressure; discharge current; voltage; inductor

For citation: Nescoromniy S.V. Special aspects of recording thermomechanical impact processes during high-voltage capacitor discharge welding. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 4, pp. 51–60. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-4-74-4.