

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

© 2018

С.В. Нескоромный, кандидат технических наук, доцент*Ю.В. Панов*, старший преподаватель*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону (Россия)*

Ключевые слова: сварка в твердой фазе; активация контактных поверхностей; магнитное давление; пластическая деформация; энергия; индуктор; толкатель; батарея конденсаторов.

Аннотация: Необходимость изготовления металлоконструкций из цветных металлов в одно- и разнородном сочетании является актуальной задачей на производстве. Основными ограничениями при сварке крепежных элементов с корпусными деталями из цветных металлов являются разнотолщинность элементов, приводящая к неравномерному тепловложению и теплоотводу, различие в электрических и теплофизических свойствах, а также вероятность образования интерметаллидных фаз за счет взаимной диффузии атомов приповерхностных слоев при протекании процессов растворения и фазовых превращениях.

Анализ конструкционного выполнения узлов аппаратуры и трудностей их изготовления показал, что формировать сварное соединение необходимо преимущественно в твердой фазе, используя высококонцентрированные импульсные источники энергии. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет высоковольтная конденсаторная сварка с индукционно-динамическим приводом (ВКС с ИДП) для создания физического контакта соединяемых деталей.

Авторами предложена методика расчета параметров процесса приварки крепежных элементов из цветных металлов к листовым элементам корпусных конструкций. Рассмотрена сущность процесса ВКС с ИДП. Приведены его энергетические параметры и геометрические параметры сборки, влияющие на качество сварного соединения.

Проведенный ранее теоретический анализ процесса ВКС, экспериментальные исследования и проектные изыскания устройств ВКС позволили разработать научно обоснованный алгоритм расчета и выбора параметров технологического процесса и оборудования для его осуществления. Алгоритм предусматривает два этапа его реализации. На первом этапе осуществляется расчет временных параметров процесса. На втором этапе рассчитывают и выбирают параметры оборудования, инструмента, удовлетворяющие выполнению условия твердофазного объемного взаимодействия. На основе полученных данных осуществляется выбор комплектующих оборудования с оснастки и последующая корректировка параметров сварки с учетом протекания процессов в твердой фазе.

Для снижения трудоемкости расчетов было разработано программное обеспечение, которое позволит определить параметры процесса ВКС, энергетические и частотные характеристики оборудования и инструмента-оснастки.

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях машиностроительного производства, химической и пищевой промышленности приходится сталкиваться с необходимостью сборки узлов посредством крепежных элементов (шпильки, бонки, гайки) с корпусной деталью, в частности при изготовлении теплоизолирующих панелей, фильтрующих элементов, коробчатых конструкций, полюсных сердечников. Основными трудностями технологии соединения крепежных элементов являются разнотолщинность деталей «корпус – крепежный элемент», что приводит к неравномерному теплоотводу; использование цветных металлов в разнородных сочетаниях, имеющих разные теплофизические свойства (температура плавления, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент термического расширения и др.).

Различие химического состава при сварке крепежных элементов из цветных сплавов приводит к появлению нежелательных хрупких фаз – интерметаллидных, изменению свойств металла в околосварочной зоне и изменениям в структуре в результате процессов диффузии, растворения, фазовых превращений компонентов свариваемых металлов. Радикально снизить растворимость одного металла в другом возможно за счет формирования сварного соединения в твердой фазе [1; 2]. В таких случаях необходимо использовать высококон-

центрированные импульсные источники энергии с регулируемой интегральной энергией в импульсе на супержестких режимах. Этим требованиям удовлетворяет высоковольтная конденсаторная сварка с индукционно-динамическим приводом (ВКС с ИДП) [3].

Анализ аналогичных методов расчета и выбора параметров оборудования показал трудоемкость таких расчетов [4], отсутствие корреляции полученных режимов с учетом серийно выпускаемых комплектующих энергетического оборудования [5; 6].

Сущность процесса ВКС с ИДП состоит в следующем (рис. 1). При разряде батарей конденсаторов C протекающий импульс тока I_p по виткам индуктора I обуславливает возникновение переменного магнитного поля напряженностью H , которая наводит вихревые токи в толкателе 1. Взаимодействие вихревых токов в толкателе 1 с магнитным полем индуктора I приводит к возникновению электродинамической силы, которая создает магнитное давление P_m , осуществляя механическое воздействие на присоединяемый стержневой элемент. Толкатель 1 электрически изолирован от стержневого элемента 2 диэлектрической вставкой 4 [7; 8]. Импульс тока, протекающий через свариваемые детали 2 и 3, разогревает приповерхностные слои металла, одновременно инициируя разрушение оксидных пленок и других загрязнений. При соударении деталей

расплавленный металл с оксидными пленками и загрязнениями вытесняется из зоны соединения на периферию стержневого элемента под действием поверхностной бегущей волны.

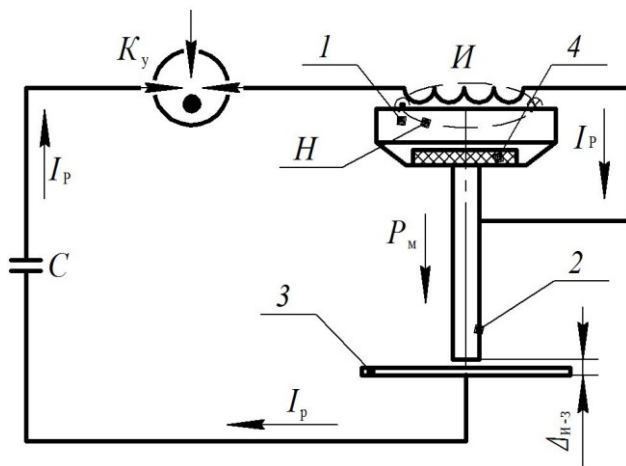


Рис. 1. Разрядный контур устройства ВКС с ИДП:
 1 – толкатель; 2 – стержневой элемент;
 3 – пластина; 4 – диэлектрическая вставка;
 I_p – разрядный ток; P_m – магнитное давление;
 K_y – коммутирующее устройство;
 C – емкостный накопитель энергии;
 I – индуктор; H – магнитное поле

Последовательное включение ИДП со свариваемыми деталями 2 и 3 позволяет варьировать соотношения импульсной и тепловой энергии, подаваемой в зону соединения, а также способствует синхронизации термомеханического воздействия. ИДП состоит из диэлектрического банджа 1 с каналом под размещение токопроводящей спирали Архимеда 2, поверх которой размещен толкатель 3 (рис. 2) [9–11]. Подключение ИДП в разрядный контур осуществляется через токоподводы 4. Длительность разряда тока I_p зависит от индуктивности разрядного контура (индуктивность элементов оборудования и спирали индуктора), характеризуемой преимущественно числом витков спирали Архимеда 2 [12]. В качестве оборудования для ВКС применяют генераторы импульсных токов (ГИТ), состоящие из высоковольтного зарядного устройства, емкостных накопителей энергии и коммутирующего устройства. Зарядное устройство включает в себя высоковольтный трансформатор и выпрямитель и, как правило, снабжено индукционно-емкостным преобразователем, обеспечивающим равномерный ток зарядки накопителя. Зарядные устройства характеризуются диапазоном напряжения заряда батарей конденсаторов и мощностью. Емкостный накопитель энергии представляет собой батарею низкоиндуктивных импульсных конденсаторов. Коммутирующие устройства предназначены для подключения емкостных накопителей энергии к нагрузке и должны обеспечивать пропускание импульсных токов величиной 1–500 кА (и более).

Основными составляющими ГИТ при выборе оборудования являются низкоиндуктивные импульсные конденсаторы, определяющие энергетические и частот-

ные характеристики разрядно-импульсного процесса. Поэтому именно емкостные накопители энергии приняты за критерий при выборе оборудования.

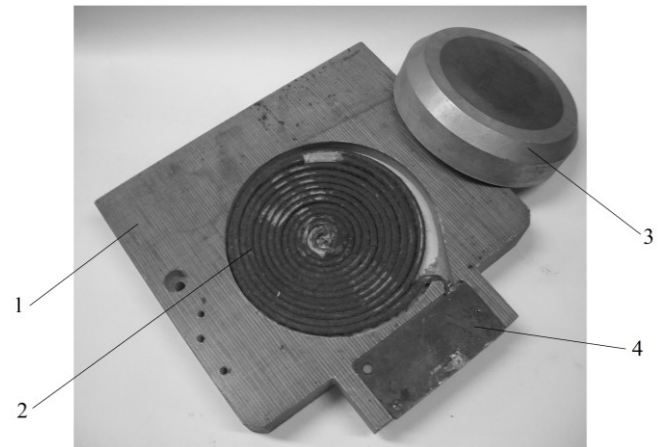


Рис. 2. Индукционно-динамический привод:
 1 – бандаж; 2 – спираль Архимеда;
 3 – толкатель; 4 – токоподводы

С учетом теплофизических свойств свариваемых материалов были разработаны следующие технологические приемы ВКС: с предварительным контактом выступа на торце стержневого элемента (рис. 3 а), с предварительным контактом стержневого элемента с листовой деталью (рис. 3 б), с предварительным зазором (рис. 3 в). В наших исследованиях [13] даны рекомендации по использованию каждого технологического приема.

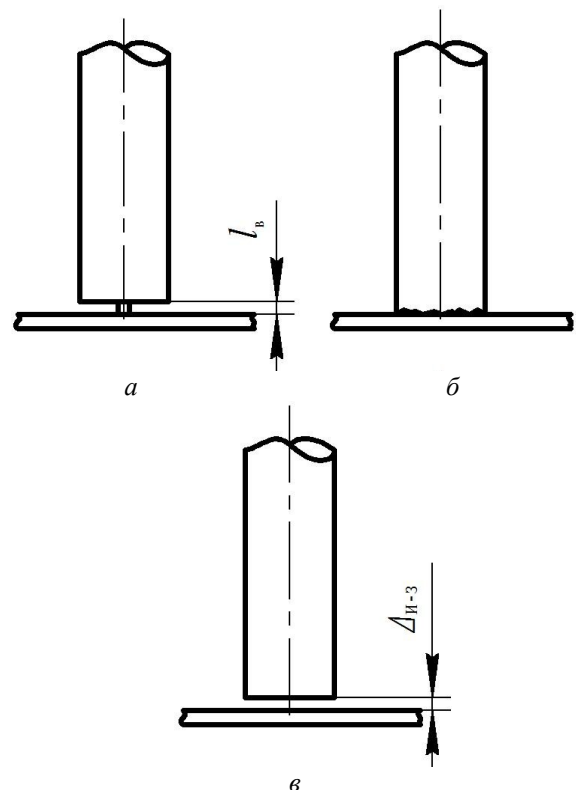


Рис. 3. Технологические схемы процесса ВКС

Цель статьи – разработка научно обоснованных методов расчета параметров процесса высоковольтной конденсаторной сварки (ВКС), оборудования и инструмента на основе полученных экспериментальных данных и теоретических исследований процесса ВКС для внедрения технологии получения сварных соединений крепежных элементов с тонкостенными конструкциями.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенный теоретический анализ процессов ВКС и экспериментальные исследования позволили выявить основные энергетические параметры процесса и геометрические параметры сборки, оказывающие влияние на качество сварных соединений (таблица 1).

На основе анализа априорной информации критерием качества получаемых сварных соединений был выбран наиболее легко контролируемый параметр – усилие на отрыв, определяемый при механических испытаниях [14; 15].

Проведенные теоретические, экспериментальные исследования и проектные изыскания устройств высоковольтной конденсаторной сварки (ВКС) позволили разработать научно обоснованный алгоритм расчета и выбора параметров технологического процесса и оборудования. Он условно разбит на два этапа (рис. 4).

На первом этапе проводят анализ свариваемой конструкции, выбор марок применяемых материалов «стержень – лист», необходимых для расчета времени релаксации напряжений t_p в зоне соединения. Для расчета времени активации t_a рассчитывают величину необходимой энергии W для реализации процесса. По номограммам, в зависимости от величины полученной энергии W , марки материала и его толщины, определяют величину относительной пластической деформации ε (рис. 5) [16–18].

Для различных технологических схем процесса в зависимости от энергии импульса $W=3500–14000$ Дж, свариваемых материалов, из которых выполнены стержневые элементы (сплавы алюминия, меди и латуни) в диапазоне диаметров 6–20 мм и толщин листовых сплавов 0,5–4,0 мм, величины относительной пластической деформации ε составляют 0,01–0,65.

Для формирования сварного соединения в твердой фазе необходимо, чтобы длительность фазы взаимодействия контактирующих поверхностей t_b ограничивалась напряжением сжатия, возникающим под действием волны растяжения, отраженной от листовой детали. В противном случае возникшие во время физического контакта металлические связи могут быть разрушены и соединение не сформировано [19].

$$t_b = \frac{2\delta_{ст}}{C},$$

где t_b – время взаимодействия;
 $\delta_{ст}$ – длина стержневого элемента, м;
 C – скорость звука в сплаве, м/с.

В зависимости от полученного времени взаимодействия t_b определяют скорость локальной пластической деформации $\dot{\varepsilon}_л$:

$$\dot{\varepsilon}_л = \frac{2\varepsilon}{t_b}. \quad (1)$$

По полученным значениям определяют время активации процесса t_a . Процесс получения сварных соединений ВКС из разнородных сплавов и разнотолщинных конструкций описывается уравнениями электродинамики, выражениями, определяющими тепловые процессы, и временными соотношениями, характеризующими выполнение условия твердофазного взаимодействия [1; 20]:

$$t_b > t_a \geq t_p,$$

где t_p – время релаксации напряжений в зоне соединения;
 t_a – время деформационной активации контактной поверхности;
 t_b – время твердофазного взаимодействия.

В развернутом виде уравнение твердофазного взаимодействия примет следующий вид:

$$\frac{2\delta_{ст}}{C} > \frac{L \cdot b}{\dot{\varepsilon}_л \cdot S_a} \geq t_0 \cdot e^{\frac{E_p}{R \cdot T^0}}, \quad (2)$$

где L – средний путь движения дислокаций до препятствия;

b – модуль вектора Бюргерса;

$\dot{\varepsilon}_л$ – скорость относительной локальной пластической деформации;

S_a – площадь активного центра;

t_0 – постоянная времени;

E_p – энергия релаксации напряжений по границам зерен [21];

R – универсальная газовая постоянная;

T^0 – температура процесса ($T^0=(0,8–0,9) \cdot T_{пл}$), °С.

На втором этапе осуществляют расчет и выбор параметров оборудования, инструмента, удовлетворяющих условию твердофазного взаимодействия (2).

В зависимости от диаметров привариваемых стержневых элементов выбирают частоту разряда тока f , принимая постоянной индуктивность разрядного контура L , которая характеризуется в основном числом витков индуктора N [22; 23], и определяют емкость накопительного блока оборудования:

$$C = \frac{1}{2\pi f \sqrt{L}}.$$

Полученную величину емкости накопительного блока батареи конденсаторов приводят к стандартной величине из ряда серийно выпускаемых конденсаторов [24]. Далее осуществляют расчет напряжения заряда батареи конденсаторов:

$$U_3 = \sqrt{\frac{2W}{C}}. \quad (3)$$

Полученное значение U_3 корректируется с учетом дискретности установки напряжения на оборудовании и сравнивается с допусковым напряжением U_d для выбранной марки конденсаторов.

Для определения энергоемкости оборудования и его частоты осуществляют уточненный расчет необходимой энергии процесса W по формуле (3) [25–27].

Таблица 1. Основные энергетические параметры процесса и геометрические параметры сборки при ВКС

№ п/п	Наименование параметров	Размерность	Область определения
Энергетические параметры процесса			
1	Рабочее напряжение, U	В	1–5000
2	Емкость накопительного блока, C	мкФ	3–2400
3	Частота разряда тока, f	Гц	1000–20000
Геометрические параметры сборки			
4	Диаметр стержня, $D_{ст}$	мм	6–20
5	Диаметр выступа, d_b	мм	$d_b=(0,13\pm 0,01)D_{ст}$
6	Длина выступа, l_b	мм	$l_b=0,15D_{ст}\pm 0,1$
7	Исходный зазор, $\Delta_{н-з}$	мм	$\Delta_{н-з}=(0,05-0,15)D_{ст}$
8	Толщина листового материала, δ	мм	0,5–4,0
9	Длина стержневого элемента $\delta_{ст}$	м	$\delta_{ст}\geq 0,6D_{ст}$
Параметры индукционно-динамического привода			
10	Индуктивность разрядного контура L , характеризующая число витков индуктора	нГн	600–10000
11	Масса толкателя, M	кг	0,5–4,0

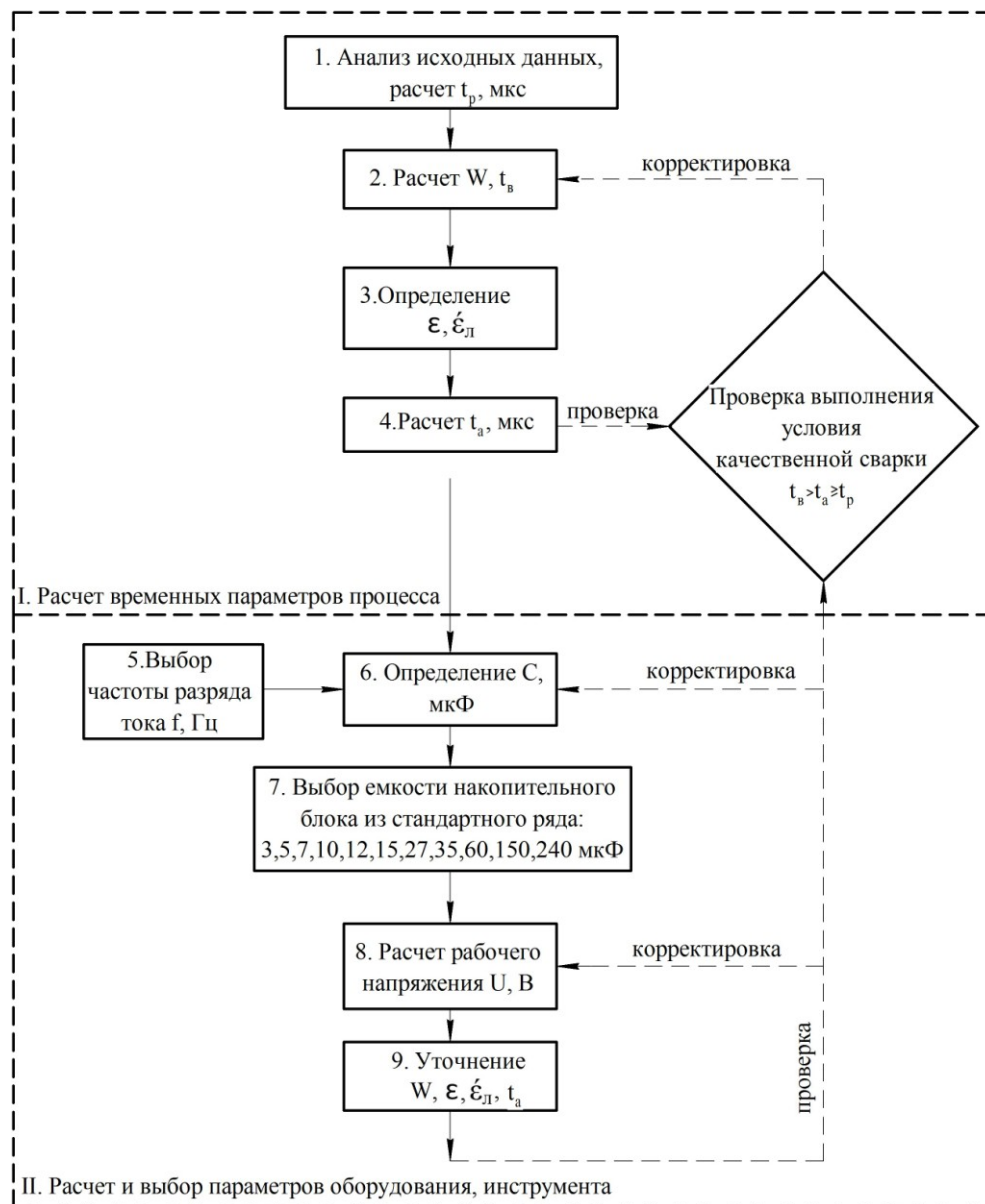


Рис. 4. Алгоритм выбора и расчета параметров процесса

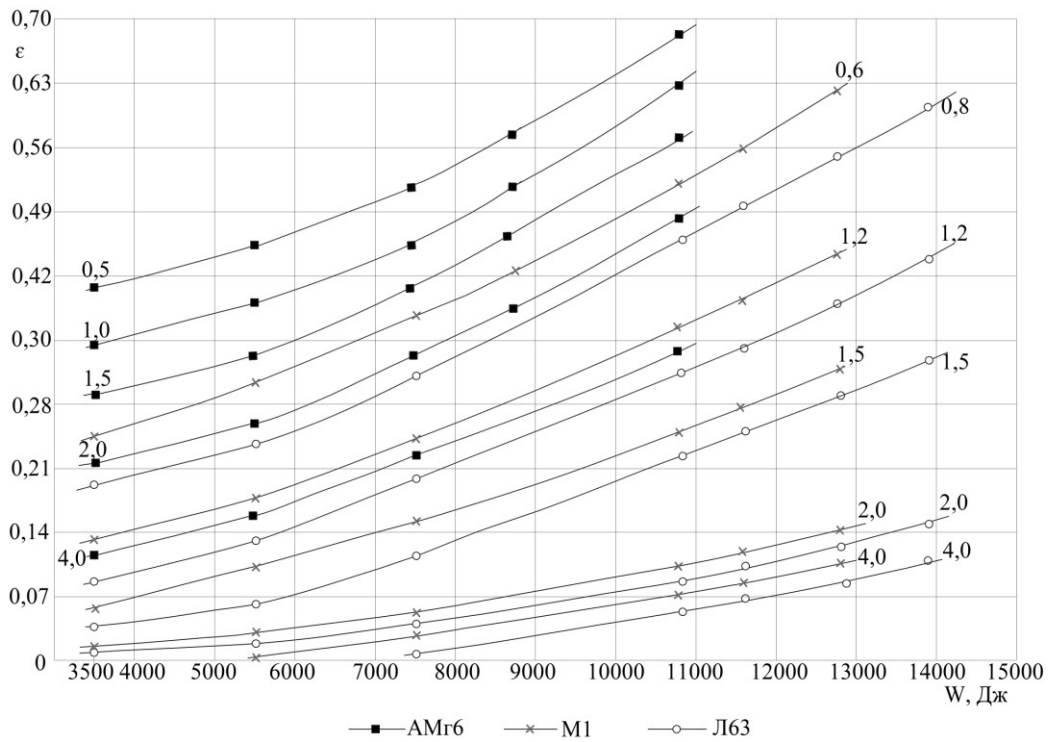


Рис. 5. Номограммы зависимости $W=f(\epsilon)$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВКС И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ С ОСНАСТКОЙ

ВЫБОР МАТЕРИАЛА

СТЕРЖЕНЬ Марка: Л63 Диаметр, мм: 10 Длина, м: 0,08
 ЛИСТ Марка: Л63 Толщина, мм: 0,8

ТЕПЛОВЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

	для стержня Л63	для листа Л63	
1	Постоянная времени, с	1E-13	1E-13
2	Средний путь движения дислокаций до препятствия, см	1E-5	1E-5
3	Модуль вектора Бюргерса, см	3E-8	3E-8
4	Универсальная газовая постоянная, кал/К*моль	1,987	1,987
5	Площадь активного центра, 1/кв см	1,2E-12	1,2E-12
6	Температура плавления, К	1178	1178
7	Диаметр стержня, мм	10	
8	Толщина листа, мм	0,8	

? Рекомендации по выбору схемы процесса

с предварительным контактом

с предварительным зазором

с предварительным контактом выступа стержневого элемента

ПРИНИМАЕМ СЛЕДУЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

Индуктивность разрядного контура оборудования с ИДП, $L = 0,0000021$ Гн [Справка](#)
 Температура процесса, К $0,9$ от Тпл [Справка](#)
 Удельная энергия оборудования и ИДП $W_{уд} = 80$ Дж/кв мм [Справка](#)

УСЛОВИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ СВАРКИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ

Время взаимодействия > Время активации > Время релаксации
 46,37 21,52 17,63

[Справка по условию твердофазного взаимодействия](#)

РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ, ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Расчетная емкость накопительного блока $C_p = 2009 \mu\text{кФ}$
 Требуемое количество конденсаторов $N = 16 \text{ шт} \times 150 \mu\text{кФ}$
 Напряжение заряда батарей конденсаторов $U_z = 2300 \text{В}$

СРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАРЯДА БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ С ДОПУСТИМЫМ

$U_d = 6000 > 2300 = U_z$ УСЛОВИЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВКС с ИДП

$W_{нов} = 6348 \text{ Дж}$ - ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УСЛОВИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ СВАРКИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ

Время взаимодействия > Время активации > Время релаксации
 46,37 21,35 17,63

[в файл](#)

Рис. 6. Экранная форма программного обеспечения расчета параметров ВКС и выбора оборудования с оснасткой

По скорректированной величине энергии W с учетом выполнения условия твердофазного взаимодействия по формуле (2) выполняют уточненный расчет времени активации процесса t_a , определяя величины ϵ , ϵ_l (рис. 5, формула (1)).

Для снижения трудоемкости расчета технологического процесса приварки стержневых элементов инженерными работниками производств на базе программной среды Delphi разработано программное обеспечение

для расчета параметров ВКС и выбора оборудования с оснасткой, которое носит инженерный характер (рис. 6).

Программа работает следующим образом. Из имеющегося перечня материалов стержня и листа выбирают марку, диаметр стержневой детали и его длину, толщину листа. Автоматически база данных выдает теплофизические свойства выбранных материалов [28]. В случае сварки разнородных материалов расчет параметров

процесса ВКС осуществляется для материала с наименьшей температурой плавления.

В зависимости от выбранной пары свариваемых материалов, предлагаются 3 технологических приема и рекомендации по их выбору. В случае необходимости отклонения от рекомендаций допускается выбрать технологический прием самостоятельно.

Далее самостоятельно выбирают индуктивность разрядного контура оборудования с ИДП L , температуру процесса T^0 , удельную энергию процесса $W_{уд}$ в рекомендуемых диапазонах, которые можно просмотреть при нажатии кнопки «справка». Программа автоматически производит расчет временных соотношений (2). В случае невыполнения равенства временных соотношений необходимо изменить длину или диаметр метиза или выбрать другую толщину листа из имеющегося диапазона.

При расчете емкости накопительного блока определяют необходимую емкость батарей конденсаторов и их количество, напряжение заряда. Выполняют сравнительный анализ по допускаемому напряжению. Приведенный уточненный расчет позволяет скорректировать энергоемкость оборудования, необходимую для получения сварных соединений в твердой фазе.

На завершающем этапе осуществляется повторная проверка временных соотношений с учетом произведенной корректировки комплектующих оборудования, параметров ИДП.

При нажатии кнопки «файл» полученные результаты сохраняются документом с расширением *txt*.

Данное программное обеспечение имеет пополняемую базу свариваемых материалов, их свойств и, соответственно, результатов расчета. С учетом полученных расчетных и экспериментальных данных погрешность результатов не превысила 20 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Обосновано использование высоковольтной конденсаторной сварки с индукционно-динамическим приводом для получения сварных соединений конструкций из цветных разнотолщинных сплавов в твердой фазе.

На основе полученных теоретико-экспериментальных данных разработана научно обоснованная методика расчета параметров разрядно-импульсного процесса. Методика включает взаимосвязь временных соотношений твердофазного взаимодействия с энергетическими и частотными параметрами оборудования и индукционно-динамического привода.

Выбор энергетического оборудования осуществлен с учетом серийно выпускаемой элементной базы, ответственной за энергетические и частотные параметры процесса в рамках твердофазного взаимодействия.

Показано, что определяющим критерием частотных характеристик процесса является индуктивность разрядного контура, характеризующая индуктивным сопротивлением ИДП. Масса толкателя ИДП определяет степень относительной пластической деформации.

Для снижения трудоемкости расчетов процесса высоковольтной конденсаторной сварки стержневых элементов на машиностроительных предприятиях разработано программное обеспечение с пополняемой базой свариваемых материалов. Алгоритм апробирован при разработке технологии изготовления узла сердечника полюса тягового агрегата электровоза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
2. Sapanathan T., Raoelison R.N., Buiron N., Rachik M. Magnetic Pulse Welding: An Innovative Joining Technology for Similar and Dissimilar Metal Pairs // Industrial Engineering and Management. Joining Technologies. London: INTECH, 2016. P. 243–273.
3. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. 632 с.
4. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Нескоромный С.В. Условия качественной обработки и алгоритм расчета и выбора параметров магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 64–67.
5. Иванов Е.Г. Расчет режима магнитно-импульсной обработки трубчатых заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. 1984. № 7. С. 17–20.
6. Магнитно-импульсная обработка металлов. Воронеж: ЭНИКМАШ, 1976. 181 с.
7. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Минько Д.В. Разрядно-импульсная обработка материалов. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2016. 201 с.
8. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л. Устройство для ударной конденсаторной сварки стержневых деталей с плоским основанием: патент РФ № 70839, 2008.
9. Стрижаков Е.Л., Петровский В.П., Чемерис В.Т. Выбор конструктивных параметров индукторов магнитно-импульсной обработки // Электронная промышленность. 1990. № 12. С. 15–17.
10. Егоров Ю.А., Карпунин В.Ф., Фомичева Л.Ф. Магнитно-импульсный привод для деформирования листовых и трубчатых заготовок // Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе: труды 1-й Международной научно-технической конференции. «Металлдеформ-99». Секция 4. Самара: СГАУ, 1999. С. 46–50.
11. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. М.: Информтехника, 1992. 143 с.
12. Weddeling C., Hahn M., Daehn G.S., Tekkaya A.E. Uniform Pressure Electromagnetic Actuator – An innovative tool for magnetic pulse welding // International Conference on Manufacture of Lightweight Components. 2014. Vol. 18. P. 156–161.
13. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В., Агеев С.О. Классификация приемов и исследование процесса высоковольтной конденсаторной сварки // Сварочное производство. 2015. № 3. С. 42–46.
14. Nescoromniy S.V., Ageev S.O., Strizhakov E.L. Development of methods and research on high voltage capacitor welding // Key Engineering Materials Submitted. 2015. Vol. 684. P. 185–192.
15. Dattoma V., Palano F., Panella F.W. Mechanical and technological analysis of AISI 304 butt joints welded with capacitor discharge process // Materials & Design. 2010. Vol. 31. № 1. P. 176–184.
16. Семенов А.П. Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании. М.: АН СССР, 1953. 120 с.
17. Семенов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. 280 с.

18. Zhisong Fan, Haiping Yu, Chunfeng Li. Plastic deformation behavior of bi-metal tubes during magnetic pulse cladding: FE analysis and experiments // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 230–243.
19. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Чвертко Н.А. Ударная конденсаторная сварка. Киев: Наук. Думка, 1984. 200 с.
20. Jones H. Formation of microstructure in rapidly solidified materials and its effect on properties // *Materials Science and Engineering: Fifth International Symposium on Plasticity of Metals and Alloys A*. 1991. Vol. 137. P. 77–85.
21. Мак Лин Д. Границы зерен в металлах. М.: Металлургиздат, 1960. 322 с.
22. Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
23. Бадьянов Б.Н. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Ульяновск: Ульяновский ГТУ, 2000. 405 с.
24. Каталог продукции: высоковольтные конденсаторы, источники питания, разрядники, системы управления. М.: Русская технологическая группа 2, 2014. 30 с.
25. Проскуряков Н.Е. Оптимизация параметров оборудования и индукторной системы при расчете технологических процессов магнитно-импульсной штамповки // *Кузнечно-штамповочное производство*. 1998. № 10. С. 27–29.
26. Карпукhin В.Ф. Определение энергии МИУ, потребной для магнитно-импульсной сварки // *Получение деталей авиационной техники методами пластической деформации металлов: межвузовский сборник*. Куйбышев: КуАИ, 1981. Вып. 2. С. 70–74.
27. Юсупов Р.Ю., Глушечков В.А. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: ИД Федоров, 2013. 128 с.
28. Теплотехнический справочник / под общ. ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. Т. 1. М.: Энергия, 1975. 744 с.
7. Strizhakov E.L., Neskromnyy S.V., Minko D.V. *Razryadno-impulsnaya obrabotka materialov* [Discharge-impulse processing of materials]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2016. 201 p.
8. Neskromnyy S.V., Strizhakov E.L. *Ustroystvo dlya udarnoy kondensatornoy svarki sterzhnevyykh detaley s ploskim osnovaniem* [Device for shock condenser welding of rod parts with a flat base], patent RF no. 70839, 2008.
9. Strizhakov E.L., Petrovskiy V.P., Chemeris V.T. The choice of constructive parameters of inductors of magnetic pulse processing. *Elektronnaya promyshlennost*, 1990, no. 12, pp. 15–17.
10. Egorov Yu.A., Karpukhin V.F., Fomicheva L.F. Magnetic pulse drive for deformation of sheet and tubular blanks. *Magnitno-impulsnaya obrabotka materialov na sovremennom etape: trudy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. "Metall-deform-99"*. Sektsiya 4. Samara, SGAU Publ., 1999, pp. 46–50.
11. Talalaev A.K. *Induktory i ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Inductors and installation for magnetic-pulse processing of metals]. Moscow, Informtekhnik Publ., 1992. 143 p.
12. Weddeling C., Hahn M., Daehn G.S., Tekkaya A.E. Uniform Pressure Electromagnetic Actuator – An innovative tool for magnetic pulse welding. *International Conference on Manufacture of Lightweight Components*, 2014, vol. 18, pp. 156–161.
13. Strizhakov E.L., Neskromnyy S.V., Merkulov R.V., Ageev S.O. Classification of receptions and research of the process of high-voltage capacitor welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 3, pp. 42–46.
14. Neskromnyy S.V., Ageev S.O., Strizhakov E.L. Development of methods and research on high voltage capacitor welding. *Key Engineering Materials Submitted*, 2015, vol. 684, pp. 185–192.
15. Dattoma V., Palano F., Panella F.W. Mechanical and technological analysis of AISI 304 butt joints welded with capacitor discharge process. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 176–184.
16. Semenov A.P. *Issledovanie skhvatyvaniya metallov pri sovместnom plasticheskom deformirovaniy* [Study of metal setting at joint plastic deformation]. Moscow, AN SSSR Publ., 1953. 120 p.
17. Semenov A.P. *Skhvatyvanie metallov* [Solidification of metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 280 p.
18. Zhisong Fan, Haiping Yu, Chunfeng Li. Plastic deformation behavior of bi-metal tubes during magnetic pulse cladding: FE analysis and experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 229, pp. 230–243.
19. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Чвертко Н.А. *Udarnaya kondensatornaya svarka* [Impact capacitor welding]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1984. 200 p.
20. Jones H. Formation of microstructure in rapidly solidified materials and its effect on properties. *Materials Science and Engineering: Fifth International Symposium on Plasticity of Metals and Alloys A*, 1991, vol. 137, pp. 77–85.
21. Mak Lin D. *Granitsy zeren v metallakh* [Grain Boundaries in Metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1960. 322 p.

REFERENCES

1. Karakozov E.S. *Soedinenie metallov v tverdoy faze* [Solid phase metal joining]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 264 p.
2. Sapanathan T., Raoelison R.N., Buiron N., Rachik M. Magnetic Pulse Welding: An Innovative Joining Technology for Similar and Dissimilar Metal Pairs. *Industrial Engineering and Management. Joining Technologies*. London, INTECH Publ., 2016, pp. 243–273.
3. Konyushkov G.V., Musin R.A. *Spetsialnye metody svarki davleniem* [Special methods of pressure welding]. Saratov, Ay Pi Er Media Publ., 2009. 632 p.
4. Strizhakov E.L., Batsemakin M.Yu., Neskromnyy S.V. Conditions for quality processing and algorithm of estimation and selection of parameters of magnetic-pulse welding of lapped joints. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2007, no. 1, pp. 64–67.
5. Ivanov E.G. Calculation of the mode of magnetic pulse processing of tubular blanks. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1984, no. 7, pp. 17–20.
6. *Magnitno-impulsnaya obrabotka metallov* [Magnetic-pulse processing of metals]. Voronezh, ENIKMASH Publ., 1976. 181 p.

22. Belyy I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* [Handbook on Magnetic-Pulse Metal Treatment]. Kharkov Vishcha shkola Publ., 1977. 168 p.
23. Badyanov B.N. *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* [Handbook on magnetic-pulse processing of metals]. Ulyanovsk, Ulyanovskiy GTU Publ., 2000. 405 p.
24. *Katalog produktov: vysokovoltnye kondensatory, istochniki pitaniya, razryadniki, sistemy upravleniya* [Catalog of the production: high-voltage capacitors, power supplies, dischargers, control systems]. Moscow, Russkaya tekhnologicheskaya gruppa 2 Publ., 2014. 30 p.
25. Proskuryakov N.E. Optimization of the parameters of the equipment and inductor system for calculating the technological processes of magnetic pulse stamping. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*, 1998, no. 10, pp. 27–29.
26. Karpukhin V.F. Determination of MIS energy required for magnetic-pulse welding. *Poluchenie detaley aviatsonnoy tekhniki metodami plasticheskoy deformatsii metallov: mezhvuzovskiy sbornik*. Kuybyshev, KuAI Publ., 1981. Vyp. 2, pp. 70–74.
27. Yusupov R.Yu., Glushchenkov V.A. *Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki materialov* [Power plants for magnetic-impulse processing of materials]. Samara, ID Fedorov Publ., 2013. 128 p.
28. Yureneva V.N., Lebedeva P.D., eds. *Teplotekhnicheskii spravochnik* [Thermal reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 744 p.

THE TECHNIQUE OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE PROCESS AND SELECTION OF EQUIPMENT FOR HIGH-VOLTAGE CONDENSER WELDING

© 2018

S.V. Nescoromniy, PhD (Engineering), Associate Professor

Yu.V. Panov, senior lecturer

Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

Keywords: solid-phase welding; activation of contact surfaces; magnetic pressure; plastic deformation; energy; inductor; pusher; capacitor bank.

Abstract: The necessity to manufacture metal structures from non-ferrous metals in one- and heterogeneous combinations is the critical task at the production site. The main constraints when welding fasteners to hull details from non-ferrous metals are the polythickness of the elements leading to uneven heat input and heat dissipation, the difference in electrical and thermophysical properties, as well as the probability of intermetallic phases' formation due to the mutual diffusion of atoms of the near-surface layers during the dissolution processes and phase transformations.

The analysis of the structural design of equipment components and the difficulties in their production showed that it is necessary to form the welded joint mainly in the solid phase using the highly-concentrated pulsed energy sources. To create physical contact of the parts to be connected, high-voltage capacitor welding with the induction-dynamic drive (HVCW with IDD) can best meet the requirements.

The authors proposed the technique to calculate the parameters of the process of welding fasteners from non-ferrous metals to the hull structures sheet elements. The essence of the process of HVCW with IDD was considered. The paper presents its energy parameters and geometric parameters of the assembly affecting the quality of the welded joint.

The previous theoretical analysis of the HVCW process, the experimental studies and design investigations of the HVCW devices allowed developing a scientifically grounded algorithm for calculating and selecting the parameters of the technological process and the equipment for its implementation. The algorithm provides for two stages of its implementation. At the first stage, the temporary options of the process are calculated. At the second stage, the parameters of the equipment and tools satisfying the condition of solid-phase volume interaction are calculated and selected. Based on the data obtained, the selection of equipment components with the tooling and the subsequent adjustment of welding parameters taking into account the course of the processes in solid phase are carried out.

To reduce the complexity of calculations, software that will allow determining the parameters of the HVCW process, the energy and frequency characteristics of equipment and tooling was developed.