

## Импульсная диффузионная сварка охватывающих соединений

© 2024

**Стрижаков Евгений Львович**, доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций  
**Нескоромный Станислав Валерьевич**<sup>\*1</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства»  
**Людмирский Юрий Георгиевич**, доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций  
**Мордовцев Николай Алексеевич**, магистрант

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону (Россия)

\*E-mail: nescoromniy@mail.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0243-7241>

Поступила в редакцию 09.04.2024

Принята к публикации 16.08.2024

**Аннотация:** Особенностью эксплуатации электровакуумных приборов, в частности катодного узла, является постоянный нагрев за счет бомбардировки его поверхности электронами. Стабильные характеристики и стойкость катодного узла зависят от качественного соединения (сварки) поверхностей керна с эмиттером по всей площади нахлесточного сопряжения. Использование диффузионной сварки для соединения катодного узла из разнородных материалов не представляется возможным по причине возникновения непроваров из-за наличия зазоров в кольцевых секторах оснастки, а следовательно, снижения срока службы катодного узла. Авторами предложено реализовать процесс путем совмещения магнитно-импульсной сварки с диффузионной. Оригинальность работы заключается в возможности дистанционного воздействия на соединение через диэлектрический кварцевый стакан, который входит в состав технологической вакуумной камеры. Индукторная система находится снаружи кварцевого стакана, что позволяет осуществлять нагрев собранного узла без нагрева инструмента – индуктора из разнородных материалов – до температуры 700 °С и выше. Определены основные параметры процесса импульсной диффузионной сварки в вакууме: давление в рабочей камере  $B=0,66 \cdot 10^{-2}$  Па ( $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.); температура предварительного разогрева  $T=700-1250$  °С; энергия импульса магнитного поля  $W=5-17$  кДж; рабочая частота разряда импульсов тока  $f_p=5-15$  кГц; магнитное давление  $P_m > 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. Таким образом были получены катодные узлы широкой номенклатуры сочетаний пар металлов с диаметром основания  $d=20$  мм и длиной образца  $L=40$  мм. Предложенная технология успешно реализована и внедрена на ОАО «Тантал». Экономический эффект заключается в снижении трудоемкости и получении соединений стабильного качества.

**Ключевые слова:** импульсная диффузионная сварка; сварка охватывающих соединений; магнитно-импульсная сварка; индуктор; магнитное давление; вводимая энергия; разнородные сплавы.

**Благодарности:** Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИИ «Микротехника» и Донскому государственному техническому университету за содействие в выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы.

**Для цитирования:** Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Людмирский Ю.Г., Мордовцев Н.А. Импульсная диффузионная сварка охватывающих соединений // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 3. С. 89–98. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-3-69-8.

### ВВЕДЕНИЕ

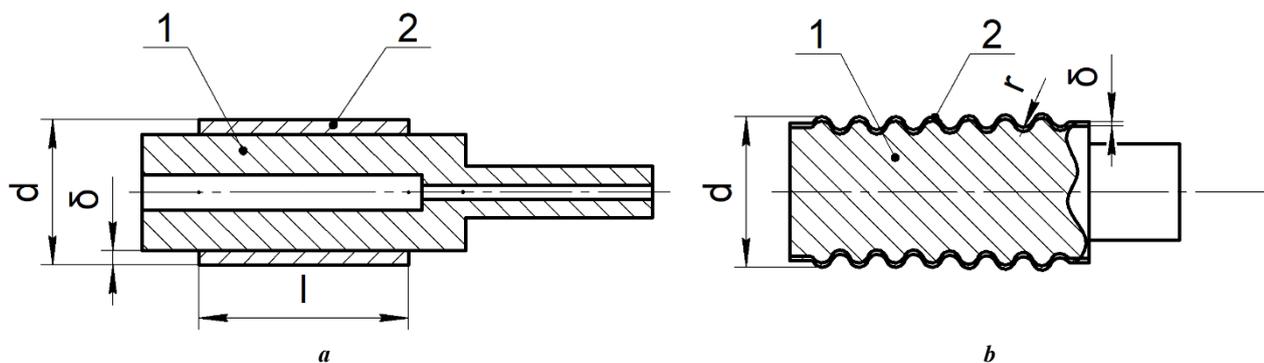
В производстве электровакуумных приборов (ЭВП) широкое применение находят эмиттерные материалы на основе сплавов платины–бария, палладия–бария, иридия–лантана и др. Соединение эмиттера с керном катода является типичной охватывающей конструкцией. Эмиттер должен свариваться с поверхностью керна в твердой фазе без перемешивания материалов. Типичные представители катодных узлов приведены на рис. 1. Особенностью работы катодного узла является его постоянный нагрев за счет бомбардировки его поверхности электронами. Для стабильного обеспечения эксплуатационных свойств и стойкости приборов необходимо обеспечивать высокое качество сварки поверхностей керна с эмиттером по всей площади нахлесточного сопряжения.

Применение классической диффузионной сварки в защитной среде со статической нагрузкой обеспечивает получение качественных соединений, что гарантирует

необходимый срок эксплуатации узлов. Более детально в работе [1] показаны примеры и параметры режимов диффузионной сварки металлов в однородном и разнородном сочетаниях. Кроме того, замена заводской технологии лазерной сварки на диффузионную позволяет повысить производительность технологии сварки до 75 % [1].

Несмотря на весомые преимущества диффузионной сварки, при нарушении ее технологии или отсутствии длительной апробации полученных соединений при различных условиях нагружения (термических, термомеханических) в процессе изготовления возникают дефекты типа непроваров, а в процессе эксплуатации – трещины, что недопустимо в ЭВП. Взаимосвязь дефектов и причин их возникновения, что необходимо учитывать при разработке технологии, применительно к конструкции свариваемых деталей описана в работе [2].

Для расширения возможностей диффузионной сварки и получения бездефектных сварных соединений



**Рис. 1.** Конструкция катодных узлов:

**a** – сварка по цилиндрической поверхности; **b** – сварка по развитой поверхности.

1 – керн; 2 – эмиттер;  $d$  – диаметр узла;  $\delta$ ,  $l$  – толщина и ширина эмиттера;  $r$  – кривизна поверхности

**Fig. 1.** Design of cathode assemblies:

**a** – welding on a cylindrical surface; **b** – welding on a developed surface.

1 – core; 2 – emitter;  $d$  – assembly diameter;  $\delta$ ,  $l$  – emitter thickness and width;  $r$  – surface curvature

возможны варианты использования промежуточных слоев, которые имеют достаточное сродство к паре трудносвариваемых между собой металлов. Доказано, что применение промежуточных слоев позволяет снизить температуру реализации процесса диффузионной сварки до 350–750 °С при сварке АРМКО-железа со сплавом никеля высокой чистоты [3].

Авторы работы [4] использовали промежуточный слой Ni для снижения вероятности образования интерметаллических соединений и получения твердых растворов Mo–Ni и Cu–Ni при диффузионной сварке Mo–Cu. В статье [5] показано, что использование промежуточного слоя Zn облегчает установление прочной связи между Al и Cu в течение короткого периода времени и низкой температуры процесса между Zn, Cu и Al. При использовании в качестве промежуточной составляющей Ag [6] и повышении температуры процесса до 700 °С выявлены образования интерметаллических соединений Ag–Ti и твердого раствора Ag вместо интерметаллических соединений Cu–Ti в сварном соединении. Применение в качестве промежуточного слоя сплава CoCrFeMnNi при диффузионной сварке Cu–Ti или 0Cr18Ni9 позволяет снизить хрупкость соединений Cu/Ti из-за образования твердых растворов при температуре процесса 800 °С [7; 8].

При отсутствии промежуточных материалов диффузионную сварку Cu и Ti осуществляли при температурах 800–900 °С. Прочность соединений на сдвиг составила около 28 МПа. Был обнаружен ряд хрупких интерметаллических соединений, таких как  $\beta$ -Cu<sub>4</sub>Ti, Cu<sub>2</sub>Ti, Cu<sub>3</sub>Ti, образующихся на границе соединения [9].

Реализуя процесс диффузионной сварки при высоких температурах, были выявлены значительные термические напряжения в соединении, увеличен размер зерен сварного шва, околошовной зоны и основного металла [10]. Авторы [10] отмечают, что с повышением температуры повышается диффузионная составляющая процесса. Так, диффузионные процессы были выявлены при изучении фазово-структурных составляющих при температуре 830 °С, давлении 15 МПа, и даже при 550–580 °С и давлении 30–40 МПа.

В результате исследований диффузионной сварки разнородных металлов выявлено, что ее необходимо осуществлять при минимально возможных температурах плавления и малой длительности процесса. Промежуточный металл должен иметь наименьшую температуру плавления по отношению к свариваемым деталям и иметь наибольшее сродство по кристаллическому строению [11].

Автором работы [12] представлены результаты исследований возможности получения биметаллических соединений сплава АМц с коваром (сплав 29НК) и никелем (сплав НП2) методом диффузионной сварки в вакууме с последующим изготовлением деталей из них. Изделия представляли собой полые цилиндрические заготовки из сплава АМц, в которые запрессовывали с приложением усилия 7000 Н при температуре 610 °С сплав 29НК или НП2 в виде цилиндрической заготовки сплошного сечения. Анализ полученных соединений при данных режимах сварки показал равномерное распределение элементов по толщине переходного слоя (шириной до 30 мкм) и взаимную диффузию, достигаемую при заданной температуре и усилии сварки. Интерметаллиды обнаружены не были.

Анализ литературных источников показал, что все сварные соединения были получены при первоначальном параллельном расположении свариваемых поверхностей друг относительно друга. Расположение свариваемых поверхностей при диффузионной сварке под углом не осуществлялось [13]. Несмотря на широкую номенклатуру полученных исследователями неразъемных соединений диффузионной сваркой, в литературных данных не выявлено информации по получению соединений из сплава МН40А с платиной, стали 12Х18Н10Т, молибдена МЧВП или сплава НВ7 со сплавом РfВа.

В Донском государственном техническом университете (ДГТУ) совместно с НИИ «Микротехника» разработан ряд процессов магнитно-импульсной сварки (МИС), позволяющих отказаться от косоугольного соударения и осуществлять очистку соединяемых поверхностей за счет электроэрозии или вакуумно-термической обработки. Авторы статьи предлагают осуществлять диффузионную сварку за счет импульсных магнитных полей,

которые обеспечивают радиальное давление на свариваемый узел по схеме «на обжим» [13].

Как и при классической диффузионной сварке, в настоящей работе предложено осуществлять разогрев собранного под сварку узла в вакууме, что приводит к снижению сопротивления материалов, деформированию и ускорению релаксации напряжений в зоне соединения, способствует очистке соединяемых поверхностей от адсорбированных включений и других загрязнений.

В основу разработки оснастки были взяты аналогичные узлы из разнородных соединений при магнитно-импульсной сборке, диффузионной сварке [14–16]. Оснастка для сварки облицовочных эмиссионных покрытий на цилиндрических поверхностях кернов приведена на рис. 2. Конструкция позволяет осуществлять прижатие свариваемых элементов во время сварки за счет разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) входящих в нее деталей. Корпусной элемент, как правило, изготавливают из молибдена, кобальта или материалов, имеющих низкий ТКЛР, а кольцевые секторы оснастки изготавливают из стали 12Х18Н10Т с высоким ТКЛР.

Из-за наличия зазоров в кольцевых секторах оснастки при диффузионной сварке эмиттера с керном возникают дефекты типа непроваров. При длительном изотермическом воздействии на обрабатываемый узел в зоне сопряжения свариваемых поверхностей зачастую возникают интерметаллидные фазы.

Для получения соединений разнородных материалов с сохранением организованной структуры широко используются импульсные методы сварки. Механизм очистки свариваемых поверхностей реализуется за счет косоугольного соударения элементов, происходит очистка сопрягаемых поверхностей кумулятивной струей и последующая совместная деформация материалов и, как следствие, соединение в твердой фазе по аналогии со сваркой взрывом. Принцип косоугольного соударения используется и в классической МИС. Меняется энергоно-

ситель: взамен действия взрывчатого вещества используется пандеромоторная сила – магнитное давление, что позволяет использовать технологию МИС для сварки малогабаритных узлов в цеховых условиях с повышенными требованиями к гигиене процесса [17; 18].

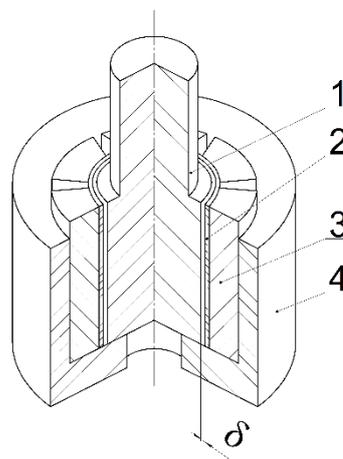
Для МИС в зависимости от конструкции собранных деталей под сварку разработаны и исследованы различные виды индукторных систем, которые характеризуются индуктивным сопротивлением, магнитной индукцией в рабочей зоне, стойкостью при эксплуатации [13–15; 19–21].

Цель работы – исследование процесса импульсной сварки в контролируемой среде, позволяющей сократить длительность получения соединения в твердой фазе из разнородных материалов.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В электровакуумных приборах используются катодные узлы диаметром  $d=(5-100)\cdot 10^{-3}$  м. Для осуществления импульсной диффузионной сварки (ИДС) в вакууме процесс производится с использованием медных оболочек – спутников [22]. Толщину стенки медных втулок подбирали таким образом, чтобы глубина проникновения магнитного поля  $H$  через материал спутника – деформируемой втулки не превышала толщину его стенки. Для получения соединений из тугоплавких материалов материал спутника был заменен на никель или молибден с толщиной стенки  $t_{сп}=0,2\cdot 10^{-3}$  м. При сварке по развитым поверхностям разогретый спутник ведет себя как эластичный пуансон.

Предлагаемая схема реализации ИДС приведена на рис. 3. Процесс осуществляется следующим образом. Керн (1) с облицовкой (2), нагревательным элементом (3) и спутником (4) устанавливают в вакуумной камере и размещают в рабочей зоне магнитно-импульсного инструмента – индуктора (6). Осуществляется разрежение воздуха в вакуумной камере до давления  $0,66\cdot 10^{-2}$  Па. Нагревательный элемент повышает температуру узла

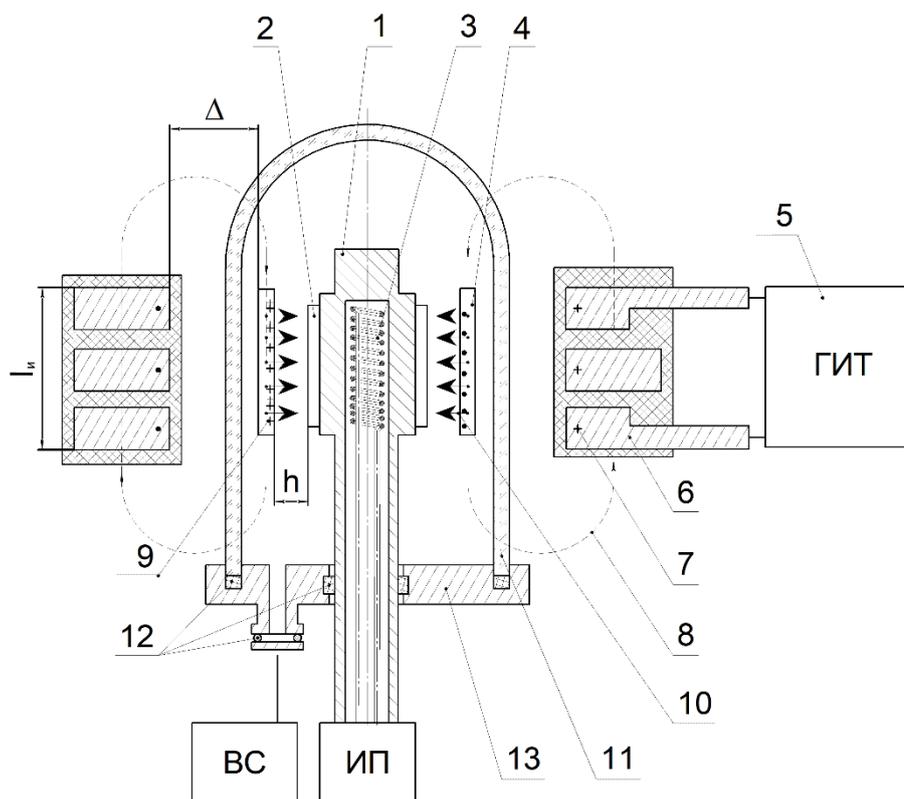


**Рис. 2.** Оснастка для диффузионной сварки катодного узла в сборе:

1 – керн; 2 – эмиттер; 3 – кольцевые секторы оснастки; 4 – корпусной элемент;  $\delta$  – предварительный зазор

**Fig. 2.** Equipment for diffusion welding of a cathode assembly:

1 – core; 2 – emitter; 3 – ring sectors of the equipment; 4 – casing element;  $\delta$  – preliminary gap



**Рис. 3.** Схема устройства импульсной диффузионной сварки в вакууме:

- 1 – основание (кern); 2 – облицовка (эмиттер); 3 – нагревательный элемент;  
 4 – спутник; 5 – генератор импульсных токов ГИТ; 6 – индуктор; 7 – ток разряда ( $I_p$ ); 8 – магнитный поток ( $H$ );  
 9 – индуцированный ток ( $I_w$ ); 10 – сила магнитного взаимодействия ( $P_M$ ); 11 – диэлектрический стакан;  
 12 – вакуумный уплотнитель; 13 – основание вакуумной камеры;  
 ИП – источник питания; ВС – вакуумная система;  $h$  – зазор между эмиттером и спутником;  
 $\Delta$  – зазор между индуктором и спутником;  $l_w$  – длина рабочей зоны индуктора

**Fig. 3.** Structure diagram of a device for pulse diffusion welding in a vacuum:

- 1 – base (core); 2 – lining (emitter); 3 – heating element;  
 4 – satellite; 5 – pulse current generator ГИТ; 6 – inductor; 7 – discharge current ( $I_p$ ); 8 – magnetic flow ( $H$ );  
 9 – induced current ( $I_w$ ); 10 – magnetic interaction force ( $P_M$ ); 11 – dielectric cup;  
 12 – vacuum seal; 13 – vacuum chamber base;  
 ИП – power source; ВС – vacuum system;  $h$  – gap between the emitter and the satellite;  
 $\Delta$  – gap between the inductor and the satellite;  $l_w$  – length of the inductor working zone

до 700–1250 °С. Генератор импульсных токов (5) разряжается на индуктор (6), обуславливая протекание тока разряда  $I_p$  (7) по индуктору. При этом магнитный поток  $H$  (8) наводит индуцированные токи в спутнике  $I_w$  (9). Возникает сила магнитного взаимодействия  $P_M$  (10). Спутник (4) деформируется (сжимается), осуществляется сварка облицовки (2) и керна (1) в твердой фазе. Длительность процесса при изотермической выдержке не превышает 100–200 мкс. При расчете характеристик процесса постоянными были приняты следующие параметры: число витков индуктора  $n=6$ , диаметр индуктора  $D_w=30 \cdot 10^{-3}$  м, длина рабочей зоны индуктора  $l_w=45 \cdot 10^{-3}$  м, емкость накопителя установки  $C=1500 \cdot 10^{-6}$  Ф, напряжение на накопителе  $U_w=5 \cdot 10^3$  В.

Были определены оптимальные параметры процесса ИДС в соответствии с условиями получения качественных сварных соединений, приведенных в литературе [23]. Первое и второе условия – это временные параметры процесса: реализация МИС должна быть завер-

шена за  $\frac{1}{2}$  периода разряда тока, включая время оплавления контактов, электровзрывной очистки, формообразования и сварки. Третье условие гласит, что значенная плотности индуцированного тока для сварки каждого материала необходимо обеспечить в диапазоне  $I_{\min}-I_{\max}$ . Четвертое условие описывает временные соотношения твердофазного взаимодействия: длительность существования контактных напряжений в зоне соединения должна быть больше времени деформационной активации контактной поверхности и времени релаксации (релаксационных характеристик обрабатываемого материала и температуры в зоне взаимодействия). Пятое условие состоит в определении удельного импульса первой полуволны магнитного давления с учетом параметров инструмента – индуктора, рабочего напряжения и индуктивности генератора импульсных токов (ГИТ), значение которой позволит определить величину относительной деформации  $\epsilon$  для нивелирования исходного зазора между индуктором и стенкой

спутника. Представленные ограничения на рабочую частоту процесса позволяют определиться с частотными характеристиками магнитно-импульсного оборудования с учетом малого проникновения магнитного потока в зазор между индуктором и спутником для обеспечения очистки свариваемых поверхностей – это шестое условие качественной обработки.

Обработка режимов диффузионной сварки производилась на установке магнитно-импульсной обработки «Импульс – БМ», изготовленной в НИИТОП (Ростов-на-Дону, Россия), в контролируемых средах [24]. На этом же оборудовании реализована технология прессования, спекания и приварки облицовочных покрытий из порошковых композиций.

Качество полученных сварных соединений импульсной диффузионной сварки определялось по результатам испытаний: проверки на герметичность гелиевым течеискателем ТИ1-50 (Россия), ГОСТ 3242-79, механического испытания на срез на машине УММ-10 (Россия), ГОСТ 6996-66, металлографического анализа полученных соединений с использованием микротвердомера ПМТ-3 (Россия), ГОСТ 9450-76, многократного циклического нагрева в вакууме электронной бомбардировкой и десятикратным разогревом до температуры 1000 °С с выдержкой в течение 1 ч и постепенным охлаждением. Время разогрева и охлаждения не превышало 1 ч, что должно обеспечивать степень разрежения при испытании не ниже  $0,66 \cdot 10^{-2}$  Па.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из зависимостей прочности сварного соединения на срез  $\tau$  от температуры процесса  $T$  для двух значений вводимой энергии 10 и 12 кДж видно, что с увеличением вводимой энергии прочность на срез возрастает (рис. 4). В то же время с увеличением температуры процесса прочностные показатели также повышаются. Наибольшие прочностные показатели образцов выявлены в диапазоне температур 500–1000 °С.

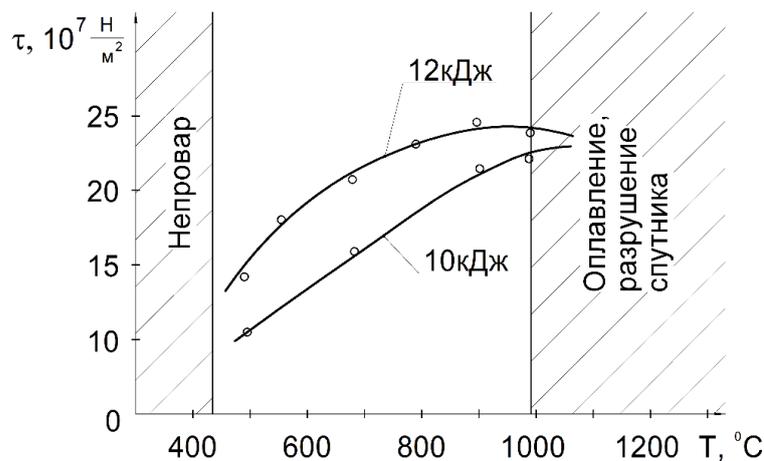


Рис. 4. Зависимость прочности соединения на срез  $\tau$  соединения Pt + МЧВП (молибден) от температуры предварительного разогрева  $T$  и энергии импульса  $W$   
 Fig. 4. Dependence of shear strength  $\tau$  of the Pt + MPVF joint on the preheating temperature  $T$  and pulse energy  $W$

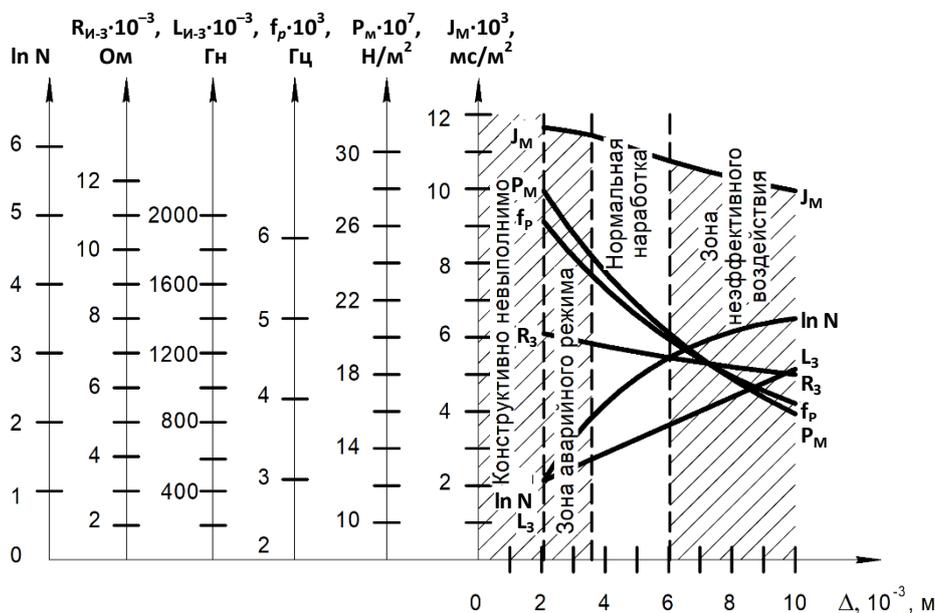
В таблице 1 представлены результаты испытаний на герметичность и механическую прочность соединений меди М06 с Pt, полученных при различной степени разрежения (давлении). Из полученных данных следует, что с увеличением степени разрежения  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  Па улучшается качество сварных соединений за счет очистки зоны соединения от загрязнений, твердофазное взаимодействие происходит по всей площади соударения свариваемых поверхностей с четкой границей зоны соединения.

Приведенные расчетные зависимости зависимости индуктивности  $L_{и-з}$  и активного сопротивления  $R_{и-з}$  системы «индуктор – заготовка», рабочей частоты  $f_p$ , силы магнитного взаимодействия  $P_m$ , удельного импульса первой полуволны магнитного давления  $J_m$ , наработки на отказ индуктора  $N_{и}$  от зазора между индуктором и медным спутником  $\Delta$  проиллюстрированы на рис. 5. Величина зазора  $\Delta$  зависит от точности изготовления самого спутника. Воздушный зазор необходим для возможности очистки от загрязнений, оксидных пленок при радиальном воздействии пондеромоторными силами, возникающими при взаимодействии магнитного потока индуктора с индуцированными токами в стенке спутника. Полученные зависимости качества сварных соединений условно разбиты на 4 зоны: 1) зазор  $(0-2,1) \cdot 10^3$  м – конструктивно собрать узел в индукторе не представляется возможным; 2) зазор  $(2,2-3,5) \cdot 10^3$  м характеризуется низкими эксплуатационными характеристиками и ресурсом работы катодного узла; 3) исходный зазор  $(3,6-6,1) \cdot 10^3$  м позволяет получить качественные сварные соединения, характеризующиеся долговечностью эксплуатации; 4) зазор более  $6,1 \cdot 10^3$  м – эффективность магнитно-импульсного воздействия снижается, в сварных соединениях возможны дефекты типа непроваров.

В случае удовлетворения условиям качественной обработки материалов [23] ИДС позволила получить неразъемные соединения следующих металлов и сплавов, применяемых при производстве изделий электронной техники. Материал основания: сплав М06, Ni,

**Таблица 1.** Результаты испытаний на герметичность, механическую прочность соединений меди М0б с Pt, полученных при различной степени разрежения (давлении) в технологической камере  
**Table 1.** Results of tests for tightness, mechanical strength of joints of M0b copper with Pt obtained at different degrees of vacuum (pressure) in the process chamber

№ п/п	Давление, Па	Результаты металлографического анализа после термодисспытаний	Прочность на срез, $\tau$ Н/м <sup>2</sup> ·10 <sup>7</sup>	Натекание, м <sup>3</sup> ·Па/с
1	1·10	Вспучивание	5,0	1·10 <sup>-4</sup>
2	5·10 <sup>-1</sup>	Вспучивание	7,5	1·10 <sup>-4</sup>
3	5·10 <sup>-2</sup>	Карманы и расслоения	11,5	4·10 <sup>-6</sup>
4	1·10 <sup>-2</sup>	Дискретный непровар	13,5	1·10 <sup>-7</sup>
5	5·10 <sup>-3</sup>	Карманов и расслоений нет	14,5	5·10 <sup>-13</sup>
6	1·10 <sup>-3</sup>	Карманов и расслоений нет, четкая граница соединения	15,0	5·10 <sup>-14</sup>
7	5·10 <sup>-4</sup>	Карманов и расслоений нет, четкая граница соединения	15,0	1·10 <sup>-15</sup>



**Рис. 5.** Расчетные зависимости:  $\Delta$  индуктивности  $L_{и-з}$  и активного сопротивления  $R_{и-з}$  системы «индуктор – заготовка», рабочей частоты  $f_p$ , силы магнитного взаимодействия  $P_M$ , удельного импульса первой полуволны магнитного давления  $J_M$  и наработки на отказ индуктора  $N_u$  от зазора между индуктором и спутником  $\Delta$

**Fig. 5.** Calculated dependencies:  $\Delta$  of the inductance  $L_{и-з}$  and active resistance  $R_{и-з}$  of the inductor-blank system, the operating frequency  $f_p$ , the magnetic interaction force  $P_M$ , the specific impulse of the first half-wave of magnetic pressure  $J_M$  and the mean time between failures of the inductor  $N_u$  on the gap between the inductor and the satellite  $\Delta$

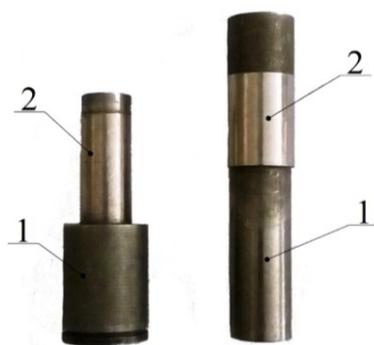
сталь 12X18H10T, сплав МН40А, сплав 29НК, молибден МЧВП, сплав НВ7. Материал облицовок: Al–Ba, Ni, Pt, Pt–Ba, Ir–La. Геометрические размеры соединений: диаметр основания  $d=20$  мм, длина образца  $L=40$  мм. На рис. 6 представлены полученные ИДС узлы, состоящие из молибденового керна (поз. 1) с Pt–Ba эмиттерами (поз. 2).

Расчетным путем [23] были определены и экспериментально подтверждены оптимальные параметры

процессов ИДС следующих катодов сверхвысокочастотных электровакуумных приборов.

1. Основание – сплав МН40А, диаметр 12 мм; облицовка: эмиттер – Pt, толщина 0,1 мм, длина 20 мм. Режим ИДС: рабочая температура  $T=700$  °С, вводимая энергия  $W=6$  кДж, магнитное давление  $P_M=10,2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

2. Основание: керна – высоколегированная сталь 12X18H10T, диаметр 12 мм; облицовка: эмиттер – сплав PtBa, толщина стенки 0,2 мм, длина 20 мм. Режим ИДС:



**Рис. 6.** Катодные узлы, полученные ИДС:  
молибденовый керн (1) с эмиттером Pt–Ba (2)  
**Fig. 6.** Cathode assemblies produced by pulse diffusion welding:  
molybdenum core (1) with Pt–Ba emitter (2)

рабочая температура  $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вводимая энергия  $W=8,67\text{ кДж}$ , магнитное давление  $P_m=12,0\cdot 10^7\text{ Н/м}^2$ .

3. Основание: керн – молибден МЧВП, диаметр 17 мм; облицовка: эмиттер – сплав PtBa, толщина  $0,1\cdot 10^{-3}$  мм, длина 30 мм. Режим ИДС: рабочая температура  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вводимая энергия  $W=10,26\text{ кДж}$ , магнитное давление  $P_m=14,22\cdot 10^7\text{ Н/м}^2$ .

4. Основание: керн – сплав НВ7, диаметр 18 мм; облицовка: эмиттер – сплав PtBa, толщина 0,15 мм, длина 40 мм. Режим ИДС: рабочая температура  $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вводимая энергия  $W=13,23\text{ кДж}$ , магнитное давление  $P_m=18,33\cdot 10^7\text{ Н/м}^2$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализированные результаты использования диффузионной сварки для соединения разнородных пар металлов показали, что разнообразие их невелико: Al–Cu, Cu–Ti, AMц–29НК. Как правило, для снижения вероятности возникновения интерметаллидных соединений применяют промежуточный металл, который имеет хорошую адгезию к свариваемым металлам и низкую температуру плавления. Результатов исследований соединений выполненных диффузионной сваркой пар металлов МН40А + Pt, сталь 12Х18Н10Т + PtBa, МЧВП + PtBa, НВ7 + PtBa в литературе найдено не было.

Исследования показали, что при температурах выше  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  при диффузионной сварке образуются интерметаллидные соединения. При температурах  $350\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$  зачастую появляются твердые растворы свариваемых металлов с промежуточным [17–21]. Предлагаемая авторами схема процесса реализуется в диапазоне температур  $700\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что должно инициировать возникновение интерметаллидных фаз, но за счет малой длительности процесса магнитно-импульсного воздействия в  $100\text{--}200\text{ мкс}$  их наличие в структуре не обнаружено.

Магнитно-импульсная сварка в основном применяется для получения разнородных соединений с высокой электро- и теплопроводностью, как правило Al+Cu. Очистку при МИС реализуют за счет кумулятивной струи, которая возникает при косом соударении металлов. При МИС охватывающих конструкций кумулятивную струю получают за счет конусной формы одной из свариваемых деталей. Разработанные конструкции ин-

дукторных систем позволяют сконцентрировать подемоторные силы в зоне магнитно-импульсного воздействия с величиной магнитной индукции до 100 Тл [13–15; 17–21]. Однако использование составных индукторов имеет существенный недостаток – наличие неравномерного магнитного поля в местах сопряжения составных элементов сектора индуктора, что снижает качество сварного соединения. Используемые авторами статьи витые индукторы имеют меньший ресурс работы в условиях работы при нормальном атмосферном давлении по сравнению с секционными, но это оправдано тем, что они имеют равномерное распределение магнитного поля. Кроме того, стойкость витых индукторов компенсируется за счет нагрева свариваемых изделий перед сваркой в вакууме до температур  $700\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что снижает величину вводимой энергии, а также расположение их вне зоны нагрева (отделены термостойким, вакуумноплотным диэлектрическим (кварцевым или керамическим) стаканом), что ранее исследователями не применялось. Такая конструктивная схема позволяет осуществлять сварку облицовочных соединений в высоком вакууме с разогревом узла до температуры свыше  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  без разрушения изоляции инструмента – индуктора для получения неразъемных соединений из разнородных пар металлов более широкой номенклатуры.

В то же время, как отмечают авторы работ по МИС, наличие зазора между индуктором и свариваемыми деталями снижает эффективность магнитно-импульсного воздействия [19–21]. Так, при магнитно-импульсном воздействии через кварцевый стакан на узел, размещенный в вакууме (рис. 5), наибольшая эффективность соединения Pt + МЧВП достигается при температурах  $500\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для других пар металлов температура может достигать  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При меньших значениях температуры в зоне соединения наблюдаются непровары, при температуре более  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит оплавление и разрушение медного спутника.

Анализ расчетных данных позволил определить конструктивно выполнимую и обеспечивающую надежную работу расположенного в атмосфере инструмента зону непроводящего зазора  $\Delta$ , равную  $(4\div 6)\cdot 10^{-3}\text{ м}$  и соответствующие ей параметры процесса, оборудования и инструмента индуктора:  $L_{H-3}$ ,  $R_{H-3}$ ,  $f_p$ ,  $P_m$ ,  $J_m$  и  $N_H$ .

Анализ сварных соединений, полученных на оптимальных режимах, показал наличие четкой границы соединяемых материалов, отсутствие общих зерен, повышенную микротвердость в зоне соединения, что характерно для различных видов сварки в твердой фазе [13] на примере катодных пар молибдена МЧВП и сплава Nb7 со сплавом PtBa.

Визуальный контроль не выявил вспучивания эмиттера, т. е. неспаров обнаружено не было. При отсутствии качественного твердофазного соединения между эмиттером и керном, последний при эксплуатации в месте неспаровара оплавляется. Анализ сварных соединений показал, что формирование соединения происходит в твердой фазе, это снижает вероятность наличия в зоне соединения интерметаллидных включений, тем самым увеличивая срок службы изделий.

Технология ИДС катодов электровакуумных приборов была разработана в НИИ «Микротехника» совместно с ДГТУ и внедрена на ОАО «Тантал». В результате освоения нового процесса удалось снизить трудоемкость сварки катодных узлов в 10 раз.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ полученных сварных соединений показал, что соединение формируется в твердой фазе, что снижает вероятность наличия в зоне соединения интерметаллидных фаз, тем самым увеличивая срок службы изделий электронной техники.

Разработана и реализована конструктивная схема спецтехнологического оборудования ИДС с индуктором в атмосфере и разогревом свариваемом узле в вакууме, что позволило обеспечить необходимую работоспособность оборудования и уменьшить трудоемкость получения вторично-эмиссионных катодных узлов сверхвысокочастотных электровакуумных приборов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кушпелев Ю.В. Диффузионная сварка в приборостроении // Вектор развития. 2022. № 11. С. 72–83. EDN: [JRIGAD](#).
- Барабанова О.А., Полунин В.А., Салмин П.А. Диффузионная сварка: возможные дефекты сварных соединений, причины их возникновения и методы контроля // Сварочное производство. 2017. № 10. С. 34–43. EDN: [Y LXALK](#).
- Люшинский А.В. Сравнение некоторых методов интенсификации процесса диффузионной сварки // Сварочное производство. 2021. № 12. С. 22–29. EDN: [JZWQSH](#).
- Zhang Jian Yang, Xu Bin, Naemul Haq Tariq, Sun MingYue, Li DianZhong, Li Yi Yi. Microstructure evolutions and interfacial bonding behavior of Ni-based superalloys during solid state plastic deformation bonding // Journal of Materials Science & Technology. 2020. Vol. 46. P. 1–11. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.11.015](#).
- Chen Chang, Qian Sanfeng, Liu Rui, Wang Shan, Liao Bin, Zhong Zhihong, Cao Lingfei, Coenen Jan W., Wu Yucheng. The microstructure and tensile properties of W/Ti multilayer composites prepared by spark plasma sintering // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 780. P. 116–130. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.11.346](#).
- Shen Qiang, Xiang Huiying, Luo Guoqiang, Wang Chuanbin, Li Meijuan, Zhang Lianmeng. Microstructure and mechanical properties of TC4/oxygen-free copper joint with silver interlayer prepared by diffusion bonding // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 596. P. 45–51. DOI: [10.1016/j.msea.2013.12.017](#).
- Ding Wen, Liu Ning, Fan Jiacheng, Cao Jing, Wang Xiaojing. Diffusion bonding of copper to titanium using CoCrFeMnNi high-entropy alloy interlayer // Intermetallics. 2021. Vol. 129. Article number 107027. DOI: [10.1016/j.intermet.2020.107027](#).
- Shen Qiang, Xiang Huiying, Luo Quoqiang, Su Xiaopeng, Zhang Lianmeng. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion bonded TC4/0Cr18Ni9/Oxygen Free Copper joints // Materials & Design. 2013. Vol. 50. P. 230–234. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.01.042](#).
- Aydın K., Kaya Y., Kahraman N. Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper // Materials & Design. 2012. Vol. 37. P. 356–368. DOI: [10.1016/j.matdes.2012.01.026](#).
- Wei Yanni, Li Yaru, Zhu Linghao, Chen Yu, Guo Bingbing. Study on inhibition of interfacial compounds and improvement of joint properties by low temperature and high-pressure process in diffusion bonding of Ti/Cu // Vacuum. 2023. Vol. 218. Article number 112636. DOI: [10.1016/j.vacuum.2023.112636](#).
- Feng Wei, Zhang Jian, Guo Hucheng, Xiao Yong, Luo Guoqiang, Shen Qiang. Dissimilar low-temperature diffusion bonding of copper and titanium using a Zn interlayer: Interfacial microstructure and mechanical properties // Intermetallics. 2024. Vol. 173. Article number 108437. DOI: [10.1016/j.intermet.2024.108437](#).
- Клокова М.С., Иванов И.А. Исследования по получению биметаллических соединений методом диффузионной сварки в вакууме // Вакуумная техника и технология. 2017. Т. 27. № 2. С. 3.1–3.3. EDN: [YVANOD](#).
- 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](#).
- Черников Д.Г., Юсупов Р.Ю., Песоцкий В.И., АLEXИНА В.К. Конструкции сборочных соединений и магнитно-импульсная технология для их реализации // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 3. С. 173–182. EDN: [FFZSNM](#).
- Глушечков В.А. Магнитно-импульсная технология сборки при производстве биметаллического заземлителя // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 8. С. 16–25. EDN: [XQTGQY](#).
- Черепнин Ю.С., Семенов А.Н., Уваров А.А. Разработка конструкции и технологии диффузионной сварки биметаллических цилиндрических соединений «аустенитная сталь – сплав циркония» // Сварочное производство. 2018. № 9. С. 16–19. EDN: [YLVD FB](#).
- 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. 2016. P. 243–273. DOI: [10.5772/63525](#).
- Angshuman Kapil, Abhay Sharma. Magnetic pulse welding: an efficient and environmentally friendly

- multi-material joining technique // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 100. P. 35–58. DOI: [10.1016/j.jclepro.2015.03.042](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.042).
19. Chen Yingzi, Yang Zhiyuan, Peng Wenxiong, Zhang Huaqing. Experimental investigation and optimization on field shaper structure parameters in magnetic pulse welding // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021. Vol. 235. № 13. P. 2108–2117. DOI: [10.1177/09544054211014846](https://doi.org/10.1177/09544054211014846).
  20. Zaytsev E., Krutikov V., Spirin A., Pararin S. Development of Multi-Part Field-Shapers for Magnetic Pulse Welding Using Nanostructured Cu-Nb Composite // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8. № 3. Article number 97. DOI: [10.3390/jmmp8030097](https://doi.org/10.3390/jmmp8030097).
  21. Ashish K. Rajak, Ramesh Kumar, Kore S.D. Designing of field shaper for the electro-magnetic crimping process // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. Vol. 33. P. 5407–5413. DOI: [10.1007/s12206-019-1035-1](https://doi.org/10.1007/s12206-019-1035-1).
  22. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Чудин В.Н., Соболев Я.А. Формообразование и диффузионная сварка элементов конструкций // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2009. № 1-1. С. 76–85. EDN: [KGLNJZ](https://www.edn.net/KGLNJZ).
  23. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Нескоромный С.В. Условия качественной обработки и алгоритм расчёта и выбора параметров магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений // *Физика и химия обработки материалов*. 2007. № 1. С. 64–67. EDN: [KVNXST](https://www.edn.net/KVNXST).
  24. Strizhakov E.L., Neskromny S.V., Ageev S.O., Lemeshev S.V. Development of discharge-pulsed equipment for applied studies of magnetic-pulsed welding processes // *Welding International*. 2016. Vol. 30. № 10. P. 813–816. DOI: [10.1080/09507116.2016.1148409](https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148409).
  6. Shen Qiang, Xiang Huiying, Luo Guoqiang, Wang Chuanbin, Li Meijuan, Zhang Lianmeng. Microstructure and mechanical properties of TC4/oxygen-free copper joint with silver interlayer prepared by diffusion bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 596, pp. 45–51. DOI: [10.1016/j.msea.2013.12.017](https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.017).
  7. Ding Wen, Liu Ning, Fan Jiacheng, Cao Jing, Wang Xiaojing. Diffusion bonding of copper to titanium using CoCrFeMnNi high-entropy alloy interlayer. *Intermetallics*, 2021, vol. 129, article number 107027. DOI: [10.1016/j.intermet.2020.107027](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107027).
  8. Shen Qiang, Xiang Huiying, Luo Quoqiang, Su Xiaopeng, Zhang Lianmeng. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion bonded TC4/0Cr18Ni9/Oxygen Free Copper joints. *Materials & Design*, 2013, vol. 50, pp. 230–234. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.01.042](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.042).
  9. Aydın K., Kaya Y., Kahraman N. Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper. *Materials & Design*, 2012, vol. 37, pp. 356–368. DOI: [10.1016/j.matdes.2012.01.026](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.026).
  10. Wei Yanni, Li Yaru, Zhu Linghao, Chen Yu, Guo Bingbing. Study on inhibition of interfacial compounds and improvement of joint properties by low temperature and high-pressure process in diffusion bonding of Ti/Cu. *Vacuum*, 2023, vol. 218, article number 112636. DOI: [10.1016/j.vacuum.2023.112636](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112636).
  11. Feng Wei, Zhang Jian, Guo Hucheng, Xiao Yong, Luo Guoqiang, Shen Qiang. Dissimilar low-temperature diffusion bonding of copper and titanium using a Zn interlayer: Interfacial microstructure and mechanical properties. *Intermetallics*, 2024, vol. 173, article number 108437. DOI: [10.1016/j.intermet.2024.108437](https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108437).
  12. Klokoval M.S., Ivanov I.A. Research on the production of bimetallic compounds by diffusion welding in a vacuum. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2017, vol. 27, no. 2, pp. 3.1–3.3. EDN: [YVANOD](https://www.edn.net/YVANOD).
  13. Strizhakov E.L., Neskromny 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](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-2-285-70-77).
  14. Chernikov D.G., Yusupov R.Yu., Pesotskiy V.I., Alekhina V.K. Designs of assembly joints and magnetic-pulse technology for their implementation. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 173–182. EDN: [FFZSNM](https://www.edn.net/FFZSNM).
  15. Glushchenkov V.A. Magnetic pulse assembly technology in the production of bimetallic earthing. *Kuznechno-shtampovoychnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2019, no. 8, pp. 16–25. EDN: [XOTGOY](https://www.edn.net/XOTGOY).
  16. Cherepnin Yu.S., Semenov A.N., Uvarov A.A. Development of the design and technology of diffusion welding of bimetallic cylindrical joints “austenitic steel – zirconium alloy”. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 9, pp. 16–19. EDN: [YLVDFFB](https://www.edn.net/YLVDFFB).
  17. 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*, 2016, pp. 243–273. DOI: [10.5772/63525](https://doi.org/10.5772/63525).
  18. Angshuman Kapil, Abhay Sharma. Magnetic pulse welding: an efficient and environmentally friendly multi-material joining technique. *Journal of Cleaner*

## REFERENCES

1. Kushpelev Yu.V. Diffusion welding in instrumentation. *Vektor razvitiya*, 2022, no. 11, pp. 72–83. EDN: [JRIGAD](https://www.edn.net/JRIGAD).
2. Barabanova O.A., Polunin V.A., Salmin P.A. Diffusion welding: possible defects of welded joints, reasons for their occurrence, and methods of control. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2017, no. 10, pp. 34–43. EDN: [YLXALK](https://www.edn.net/YLXALK).
3. Lyushinskiy A.V. Comparison of some methods of intensification of the diffusion welding process. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2021, no. 12, pp. 22–29. EDN: [JZWQSH](https://www.edn.net/JZWQSH).
4. Zhang Jian Yang, Xu Bin, Naemul Haq Tariq, Sun Mingyue, Li Dianzhong, Li Yi Yi. Microstructure evolutions and interfacial bonding behavior of Ni-based superalloys during solid state plastic deformation bonding. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, vol. 46, pp. 1–11. DOI: [10.1016/j.jmst.2019.11.015](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.11.015).
5. Chen Chang, Qian Sanfeng, Liu Rui, Wang Shan, Liao Bin, Zhong Zhihong, Cao Lingfei, Coenen Jan W., Wu Yucheng. The microstructure and tensile properties of W/Ti multilayer composites prepared by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 780, pp. 116–130. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.11.346](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.346).

- Production*, 2015, vol. 100, pp. 35–58. DOI: [10.1016/j.jclepro.2015.03.042](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.042).
19. Chen Yingzi, Yang Zhiyuan, Peng Wenxiong, Zhang Huaiqing. Experimental investigation and optimization on field shaper structure parameters in magnetic pulse welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, vol. 235, no. 13, pp. 2108–2117. DOI: [10.1177/09544054211014846](https://doi.org/10.1177/09544054211014846).
20. Zaytsev E., Krutikov V., Spirin A., Pararin S. Development of Multi-Part Field-Shapers for Magnetic Pulse Welding Using Nanostructured Cu-Nb Composite. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8, no. 3, article number 97. DOI: [10.3390/jmmp8030097](https://doi.org/10.3390/jmmp8030097).
21. Ashish K. Rajak, Ramesh Kumar, Kore S.D. Designing of field shaper for the electro-magnetic crimping process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, pp. 5407–5413. DOI: [10.1007/s12206-019-1035-1](https://doi.org/10.1007/s12206-019-1035-1).
22. Yakovlev S.P., Yakovlev S.S., Chudin V.N., Sobolev Ya.A. Shape formation and diffusion welding of structural elements. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 1-1, pp. 76–85. EDN: [KGLNJZ](https://www.edn.net/KGLNJZ).
23. 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. EDN: [KVNXST](https://www.edn.net/KVNXST).
24. Strizhakov E.L., Neskromny S.V., Ageev S.O., Lemeshev S.V. Development of discharge-pulsed equipment for applied studies of magnetic-pulsed welding processes. *Welding International*, 2016, vol. 30, no. 10, pp. 813–816. DOI: [10.1080/09507116.2016.1148409](https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1148409).

## Pulse diffusion welding of female joints

© 2024

**Evgeny L. Strizhakov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, leading researcher of the Center for Scientific Competencies  
**Stanislav V. Neskromnyy**\*<sup>1</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Machines and Automation of Welding Engineering”  
**Yury G. Lyudmirsky**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, leading researcher of the Center for Scientific Competencies  
**Nikolay A. Mordovtsev**, graduate student

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

\*E-mail: [neskromny@mail.ru](mailto:neskromny@mail.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0243-7241>

Received 09.04.2024

Accepted 16.08.2024

**Abstract:** Special feature of operation of electrovacuum tubes, in particular the cathode assembly, is constant heating due to bombardment of its surface with electrons. Stable characteristics and durability of the cathode assembly depend on high-quality connection (welding) of the core surfaces with the emitter over the entire area of the overlapped conjugation. The use of diffusion welding for joining a cathode assembly made of dissimilar materials is not possible due to the occurrence of poor welding fusion due to the presence of gaps in the ring sectors of the equipment, and, consequently, a decrease in the service life of the cathode assembly. The authors proposed to implement the process by combining magnetic pulse welding with diffusion welding. The originality of the work is the possibility of remote action on the joint through a dielectric quartz cup, which is a part of the technological vacuum chamber. The inductor system is outside the quartz cup, which allows heating the assembled unit without heating the tool – an inductor made of dissimilar materials – to a temperature of 700 °C and higher. The authors determined the main parameters of the process of pulse diffusion welding in vacuum: pressure in the working chamber is  $B=0.66 \cdot 10^{-2}$  Pa ( $5 \cdot 10^{-5}$  mm Hg); preheating temperature is  $T=700–1250$  °C; magnetic field pulse energy is  $W=5 \div 17$  kJ; operating frequency of current pulse discharge is  $f_d=5–15$  kHz; magnetic pressure is  $P_m > 10^7$  N/m<sup>2</sup>. In this way, cathode assemblies of a wide range of metal pair combinations with a base diameter of  $d=20$  mm and a sample length of  $L=40$  mm were produced. The proposed technology has been successfully implemented and introduced at Tantal (Open Joint Stock company). The economic effect consists in reducing labor intensity and obtaining joints of stable quality.

**Keywords:** pulse diffusion welding; welding of female joints; magnetic pulse welding; inductor; magnetic pressure; input energy; dissimilar alloys.

**Acknowledgements:** The authors of the paper express gratitude to the staff of Microengineering Research Institute and Don State Technical University for their assistance in carrying out research and development work.

**For citation:** Strizhakov E.L., Neskromnyy S.V., Lyudmirsky Yu.G., Mordovtsev N.A. Pulse diffusion welding of female joints. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 3, pp. 89–98. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-3-69-8](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-3-69-8).