

УДК 621.791.77

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-70-77

*Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Ю. Г. Людмирский, Н. А. Мордовцев***МЕТОДЫ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ (ОБЗОР)****Донской государственный технический университет**

e-mail: nescoromniy@mail.ru

В статье приведены особенности различных методов импульсной сварки в твердой фазе с использованием магнитного давления по схеме с нормальным нагружением.

Описана схема магнитно-импульсной сварки, реализуемой за счет электроэрозионной очистки без косого соударения. Магнитное давление используется для формообразования и сварки.

Авторами предложена оригинальная схема получения охватывающих конструкций из разнородных сплавов путем предварительного разогрева собранного узла в вакууме с последующей опрессовкой через передающую среду «спутник» индуктором по схеме «на обжим».

Для получения соединений типа «стержень – лист» в разнородном сочетании материалов и разнотолщинных конструкций авторами предложено осуществлять последовательное соединение магнитного молота со свариваемыми деталями, что позволяет синхронизировать процесс теплового и силового воздействий на свариваемые поверхности. Разработаны различные схемы сопряжения свариваемых деталей, в том числе с использованием порошковых композиций в качестве связующего элемента.

В статье представлены результаты металлографических исследований сварных образцов, подтверждающих образование соединений в твердой фазе при использовании описанных методов МИС.

Для реализации представленных технологических процессов создано универсальное спецтехнологическое разрядно-импульсное оборудование, позволяющее реализовывать процессы сварки, штамповки, пресования, опрессовки, электровзрыва проводников и электрогидроимпульсной обработки материалов.

Ключевые слова: косое соударение, кумулятивная струя, магнитное давление, штампосварная конструкция, вакуумно-термическая обработка, электроэрозионная очистка, магнитный молот, термическое и динамическое воздействие, соединение в твердой фазе.

*E. L. Strizhakov, S. V. Nescoromniy, Yu. G. Lyudmirsky, N. A. Mordovtsev***METHODS OF MAGNETIC PULSE WELDING****Don State Technical University**

The article presents the features of various methods of pulsed welding in the solid phase using magnetic pressure according to a scheme with normal loading.

A scheme of magnetic-pulse welding, implemented through electrical discharge cleaning without oblique impact, is described. Magnetic pressure is used for forming and welding.

The authors proposed an original scheme for producing enclosing structures from dissimilar alloys by preheating the assembled unit in a vacuum, followed by crimping through the transmitting medium «shell» with an inductor according according to the «crimp» scheme.

To obtain joints of the «rod-sheet» type in a heterogeneous combination of materials and structures of different thicknesses, the authors proposed to carry out a sequential connection of a magnetic hammer with the parts being welded, which allows synchronizing the process of thermal and force effects on the surfaces being welded. Various schemes for mating parts to be welded have been developed, including those using powder compositions as a connecting element.

To implement the presented technological processes, universal special technological discharge-pulse equipment has been created, which makes it possible to implement the processes of welding, stamping, pressing, crimping, electric explosion of conductors and electrohydropulse processing of materials.

Keywords: oblique impact, cumulative jet, magnetic pressure, stamp-welded structure, vacuum-heat treatment, electrical discharge cleaning, magnetic hammer, thermal and dynamic effects, solid-phase connection.

Для получения соединений разнородных материалов с сохранением организованной структуры широко используются импульсные методы сварки. Наиболее известным является сварка взрывом [1]. За счет косого соударения метаемаемых элементов происходит очистка кумулятивной струей сопрягаемых поверхностей

и последующая совместная деформация материалов и, как следствие - соединение в твердой фазе [2]. Принцип косого соударения используется и в классической магнитно-импульсной сварке (МИС) [3]. Меняется энергоноситель: взамен взрывчатому веществу используется пандеромоторная сила – магнитное давление,

что позволяет использовать технологию МИС для сварки малогабаритных узлов в цеховых условиях с повышенными требованиями к гигиене процесса. Схемы классической МИС приведены на рис. 1.

Сборка с последующей сваркой охватывающих конструкций, рис. 1, а реализуется по схеме «на обжим». Индуктор устанавливается снаружи, детали позиционируют с технологическим зазором $\delta = 0,2-1,0$ мм. Торцевая цилиндрическая заготовка имеет конус с углом α . При МИС происходит схватывание свариваемых поверхностей за счет косоугольного соударения поверхностей деталей под действием магнитного

давления, возникающего при взаимодействии тока в индукторе с током, наведенным в цилиндрической полой заготовке.

Реализация МИС с изменяющимся вдоль зоны обработки магнитным давлением приведена на рис. 1, б. Индуктор имеет форму конуса с углом $\alpha = 7-15^\circ$. Детали также устанавливают с технологическим зазором $\delta = 0,2-1,0$ мм. Наибольшее магнитное давление P_m наблюдается в начальной точке контакта свариваемых деталей, далее давление снижается. В результате создается перемещающаяся косоугольная сварка, возникает очищающая кумулятивная струя.

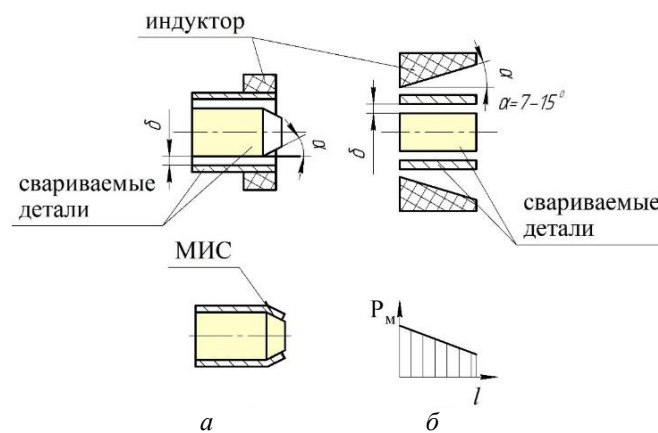


Рис. 1. Схемы классической МИС

Приведенные схемы косоугольного соударения не позволяют получать длинномерные охватывающие соединения, трубчатые конструкции сложной формы и сварку разнотолщинных конструкций.

Целью статьи является анализ новых способов МИС с нормальным нагружением (без косоугольного соударения).

На кафедре «МиАСП» ДГТУ совместно с НИИ «Микротехники» разработаны ряд процессов МИС, позволяющих отказаться от косо-

угольного соударения и осуществлять очистку соединяемых поверхностей за счет электроэрозии или вакуумно-термической обработки.

Одна из таких разработок связана с изготовлением штамповых конструкций.

Сварка осуществляется за счет индуцированных токов, протекающих через нахлесточное соединение кромок заготовки. Магнитное давление осуществляет формообразование, сближение и сварку. Схема МИС штамповой детали приведена на рис. 2.

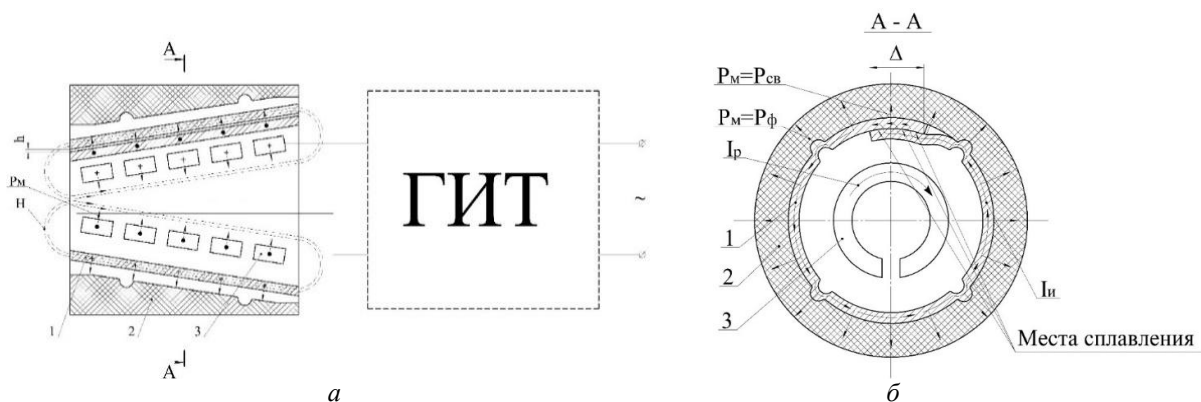


Рис. 2. Схема МИС штамповой детали: а, б – начало и окончание процесса

Генератор импульсных токов (ГИТ) обеспечивает протекание тока разряда I_p по виткам конического индуктора 3 и создается переменный магнитный поток H , рис. 2, а. В свернутой с перехлестом Δ свариваемой заготовке 1 протекает наведенный индуцированный ток $I_{ин}$, в исходном зазоре h возникает импульсная дуга, которая разогревает и оплавляет поверхности. Возникающее в результате взаимодействия $I_{ин}$ и магнитного потока H пандероматорное усилие P_m сближает кромки, прижимая их к диэлектрической матрице 2, жидкий металл с загрязнениями выплескивается из зоны перехлеста. Осуществляется электроэрозионная очистка. Далее ювенильные поверхности совмест-

но деформируются – происходит сварка в твердой фазе, рис. 2, б. В зоне перехлеста давление является сварочным ($P_m = P_{св}$). В других зонах заготовка прижимается к диэлектрической матрице и происходит деформация отдельных участков заготовки. Давление P_m является в данном случае формообразующим ($P_m = P_{ф}$). Изделие принимает форму матрицы [4, 5, 6].

Микроструктурный анализ показал, что зона соединения характерна для сварки в твердой фазе. Граница раздела – зона «схватывания», аналогична сварке взрывом или классической магнитно-импульсной сварке. На рис. 3 изображен микрошлиф из алюминиевой фольги.



Рис. 3. Микротвердость HV в зоне соединения и околошовной зоне алюминиевой фольги марки ДПРХМ

Общий вид штампосварных экранирующих корпусов-электросоединителей, изготовленных магнитно-импульсной сваркой-формовкой (МИСФ) трех типоразмеров приведен на рис. 4. Трубчатые замкнутые конструкции из алюминиевой фольги имеют перепады диаметра, резьбовой участок, сквозное отверстие и гофры, придающие жесткость изделию.



Рис. 4. Штампосварные экранирующие облегченные корпуса электросоединителей, диаметры $D=10-40$ мм, длины $L=15-30$ мм

Оригинальным является реализация МИС с нормальным нагружением с предварительной очисткой зоны сопряжения разогревом в контролируемой среде – вакууме.

Так осуществляется магнитно-импульсная сварка в вакууме (МИСВ) эмиссионных металлоглазных покрытий катодных узлов СВЧ электровакуумных приборов (ЭВП). Соединяемые материалы: Мо (керн) + PtBa (эммитер).

Схема МИСВ вторично-эмиссионных катодов СВЧ ЭВП приведена на рис. 5 [7].

МИС осуществлялась с использованием одного из приемов магнитно-импульсной обработки: воздействия через передающую оболочку – «спутник».

Одним из составляющих технологического блока (ТБ) поз. 1 является вакуумная камера 2, позволяющая обеспечить высокий вакуум $p = 5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. за счет насосов, входящих в состав вакуумной системы ВС.

Индуктор высокочастотного разогрева 3, подключенный к источнику питания ВЧ генератору за счет наведенных токов в узле 4, осуще-

ствляет нагрев до температуры 7000–1000 °С. Разогретый узел, состоящий из облицовки – эмитера 5, основания – керна 6 и спутника (эле-

мента передающего давление) 7 переводится электромеханическим приводом в зону индуктора магнитно-импульсной опрессовки (МИО) 9.

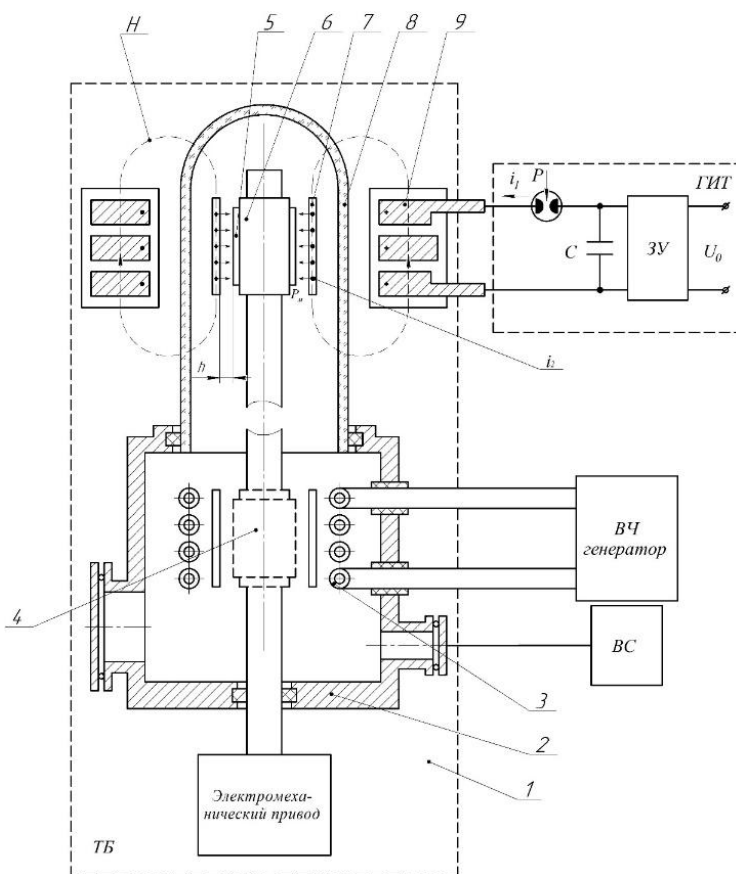


Рис. 5. Схема устройства магнитно-импульсной сварки эмиссионных покрытий в вакууме

Генератор импульсных токов (ГИТ) обеспечивает протекание разрядного тока i_1 , по виткам индуктора МИО, обуславливая возникновение магнитного потока H через герметизирующий контейнер – кварцевый стакан 8. В спутнике 7 возникает наведенный ток i_2 . Возникающее магнитное давление P_m в стенке

спутника, преодолевая зазор между спутником и облицовкой h сближает разогретые свариваемые поверхности, реализуя МИСВ в твердой фазе

Микротвердость зоны соединения катодных пар молибдена МЧВП + PtBa, сплава НВ7 + Pt приведена на рис. 6.

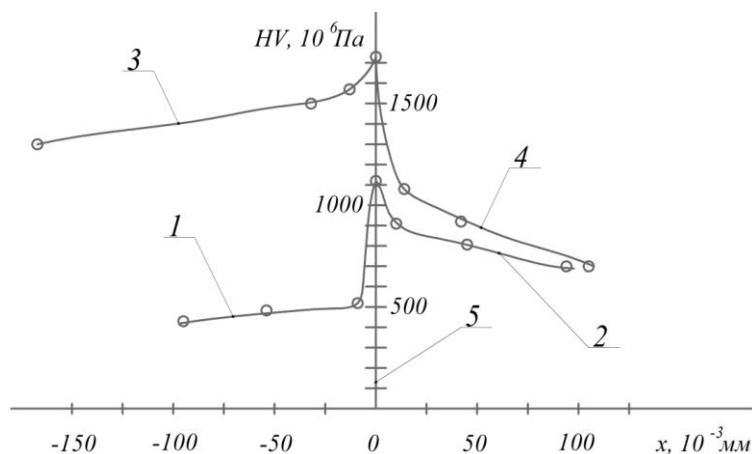


Рис. 6. Микротвердость зоны соединения:
1 – молибден МЧВП; 2 – PtBa; 3 – сплав НВ7; 4 – Pt; 5 – зона соединения; x – расстояние от зоны соединения

Твердость в зоне соединения 5 повышена, что характерно для сварки в твердой фазе [7]. Металлографические исследования зоны соединения не выявили образования общих зерен при сварке разнородных материалов.

Аналогично осуществляется прессование и приварка эмиссионных покрытий из порошковых композиций [8].

Замена технологии диффузионной сварки (ДС) на МИСВ позволила значительно увеличить производительность изготовления вторично-эмиссионных катодов и сократить затраты на изготовление металлоемкой дорогостоящей оснастки ДС. На рис. 7 показаны катодные узлы СВЧ ЭВП, полученные МИСВ.



Рис. 7. Катодные узлы СВЧ ЭВП

В ДГТУ разработан и исследуется метод высоковольтной конденсаторной сварки (ВКС) с использованием магнитного давления для термического и силового воздействий. Схема импульсной сварки с магнитным молотом приведена на рис. 8 [9, 10].

В состав магнитного молота 3 входит индуктор с толкателем. Индуктор состоит из диэлектрического корпуса с размещенной внутри спиралью.

В электрическую цепь с генератором ГИТ последовательно включают стержневой элемент 1 с плоской деталью 2 и магнитным молотом 3 с целью синхронизации процесса теплового и силового воздействия.

При протекании тока разряда I_p через витки индуктора возникает магнитный поток H , который наводит индуцированные токи $I_{ин}$ в толкателе магнитного молота 3. Взаимодействие $I_{ин}$ с H

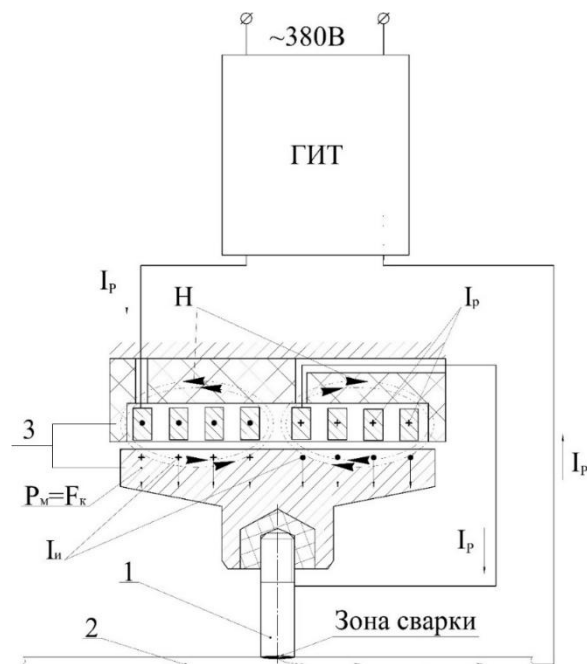


Рис. 8. Схема ВКС с магнитным молотом

приводит к возникновению магнитного давления P_m , которое является ковочным усилием F_k .

В зависимости от сочетаний свариваемых металлов, разработаны различные схемы сопряжения заготовок в исходном состоянии, рис. 9.

При сварке пластичных металлов в однородном сочетании рекомендуется применять схему без зазора, рис. 9, а. При сварке цветных металлов в разнородном сочетании – с исходным зазором приведенную на рис. 9, б. При сварке цветных металлов со сталями – схему с рельефом на торце стержневого элемента, рис. 9, в.

Соединение из разнородных материалов возможно осуществлять с использованием промежуточной порошковой композиции. Сварку проволоки (соединяемая деталь) с плоской деталью или трубой (соединяемая деталь) осуществляют путем пропускания тока через электрод – пуансон 1 и порошковую композицию 2, заключенную в диэлектрическую обойму 3 (рис. 9, г).

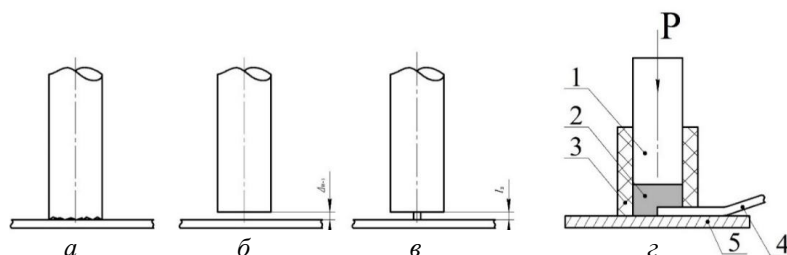


Рис. 9. Различные схемы сопряжения соединяемых разнородных деталей при импульсной сварке с магнитным воздействием

Сварная конструкция тонколистовой детали со стержневыми элементами из разнородных материалов приведена на рис. 10 [11, 12].

Микроструктура и микротвердость экспериментальных образцов приведена на (рис. 11, а, б).



Рис. 10. Конструкция из разнородных, разнотолщинных сплавов: листовой металл из сплава Л63 толщиной 0,8 мм, стержневые элементы из сплавов АМг2,5, М1, Л63 диаметром 10 мм

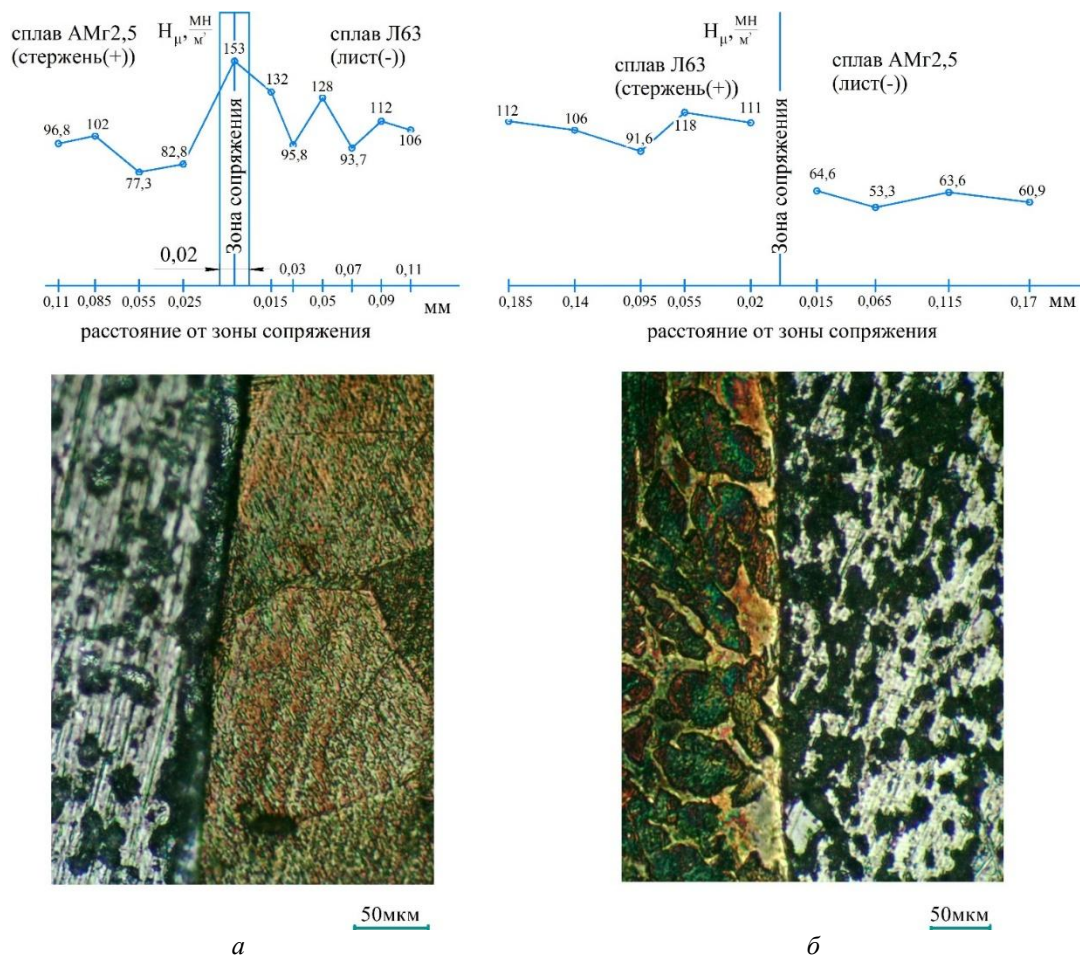


Рис. 11. Микроструктура и микротвердость экспериментальных образцов, полученных ВКС: а – стержень АМг2,5+лист Л63; б – стержень Л63+лист АМг2,5

Микротвердость в зоне соединения (рис. 11, а) повышена, что свидетельствует об интенсивной пластической деформации при соударении деталей. Структура листа α – латунь с содержа-

нием β-фазы. Благодаря повышенной травимости, β-фаза наблюдается в виде впадин темного цвета. В-фаза является твердым раствором Zn в Cu.

Макроструктурный анализ соединения показал, что зона соединения не претерпевает существенных изменений.

На рис. 12 представлены макро- и микрошлиф соединений материалов с медной проволокой М1к диаметром 1,2 мм ВКС с использованием в качестве связующего элемента медного порошка.

Исследования микрошлифа показывают, что

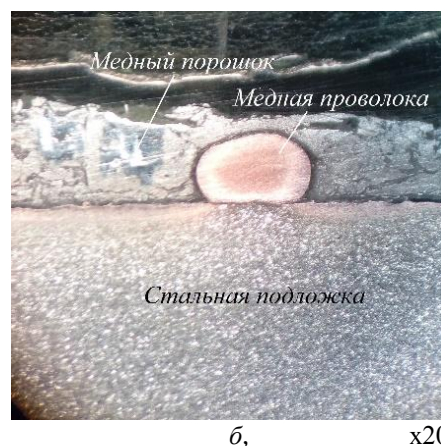
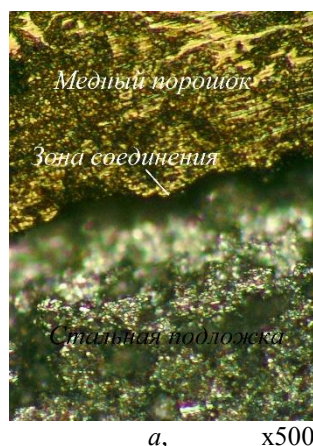


Рис. 12. Микро- и макрошлиф соединений, полученных ВКС с использованием порошкового материала

Прочность соединения медной проволоки со стальной подложкой при замоноличивании медным порошком достигает 250Н [14].

В НИИ «Микротехники» и ДГТУ создано спецтехнологическое разрядно-импульсное оборудование различного назначения [15,16]. В качестве примера на рис. 13 приведено оборудование магнитно-импульсной сварки в контролируемой среде «Импульс БМ».

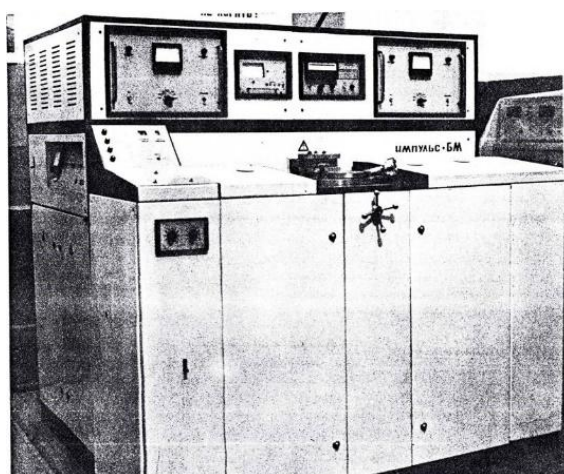


Рис. 13. Установка МИС «Импульс БМ»

Полуавтомат имеет встроенный генератор импульсных токов энергоемкостью 30 кДж

между порошковой прессовкой ПМС-К и стальной подложкой Сталь ВСтЗсп видна четкая граница раздела, в которой не обнаружены интерметаллиды и другие включения, что свидетельствует о формировании соединения в твердой фазе, рис. 12, а. На макрошлифе рис.12, б видно, что проволока имеет деформированную овальную форму, возникшую в результате ковочного усилия F_k индукционно-динамического привода.

и вакуумный блок с восьмипозиционным карусельным агрегатом. Оборудование используется в производстве СВЧ электровакуумных приборов.

Разработанное оборудование магнитно-импульсной сварки универсальное и может быть использовано для процессов сварки, штамповки, прессования, электровзрыва проводников и электрогидроимпульсной обработки материалов [17].

Заключение

Изложены физические основы магнитно-импульсных способов сварки и технические решения, используемые в разработанных комбинированных процессах. Импульсную сварку с использованием магнитных полей без косого соударения (с нормальным силовым нагружением) предлагается совмещать с электроэрозионной и вакуумно-термической обработкой, формообразованием, ударной осадкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сварка взрывом: процессы и структуры / под ред. Б. А. Гринберг, М. А. Иванова, С. В. Кузьмина, В. И. Лыска. – М. : Инновационное машиностроение, 2017. – 236 с.
2. Конюшков, Г. В. Специальные методы сварки давлением / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин // Изд. Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 632 с.

3. Дудин, А. М. Магнитно-импульсная сварка металлов / А. М. Дудин. – М. : Энергия, 1979. – 128 с.
4. Magnetic-pulsed resistance welding-forming of shell structures / E. L. Strizhakov, A. D. Glinberg, V. V. Plotnikov etc. // *Welding International*. 2001. Vol. 15(4). – P. 327–329.
5. Стрижаков, Е. Л. Технология магнитно-импульсной сварки-формовки облегченных экранирующих корпусов заделки кабеля в штепсельный разъем / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, С. О. Агеев // *Сварочное производство*. – 2014. – № 12. – С. 48–50.
6. Условия качественной обработки и алгоритм расчета и выбора параметров магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, С. В. Нескоромный // *Физика и химия обработки материалов*. – 2007. – № 1. – С. 64–67.
7. Стрижаков, Е. Л. Магнитно-импульсная сварка вторично-эмиссионных катодов электровакуумных приборов / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, С. О. Агеев // *Сварочное производство*. – 2018. – № 5. – С. 53–58.
8. Strigakov E. L., Kem A. Yu. and Bokov A. I. Technological features of obtaining of compound powder parts with usage innovative P/M processes for high performance metals –vacuum - thermal magneto - pulse pressing // 16th International PLANSEE Seminar 2005. Reutte/Tirol, Austria. V.4, p.287-293.
9. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Р. В. Меркулов // *Сварочное производство*. – 2009. – № 2. – С. 33–35.
10. Nescoromniy S.V. Development of methods and research on high voltage capacitor Welding / S.V. Nescoromniy, S.O. Ageev, E.L. Strizhakov // *Key Engineering Materials Submitted*, 2015. - Vol. 684, pp 185-192
11. Меркулов, Д. С. Анализ электромагнитно-импульсных способов сварки цветных сплавов / Д. С. Меркулов, С. В. Нескоромный // *Актуальные проблемы науки и техники*. 2023: матер. Всерос. (национальной) науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 15–17 марта 2023 года / отв. ред. Н. А. Шевченко. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2023. – С. 116–118.
12. Нескоромный, С. В. Формирование неразъемных соединений из разнородных сплавов в условиях супержестких режимов термодинамического воздействия / С. В. Нескоромный // *Сварка и контроль: сб. ст.* – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 15–19.
13. Нескоромный, С. В. Формирование неразъемных соединений разнородных сплавов электромагнитно-импульсным воздействием на супержестких режимах / С. В. Нескоромный // *Сварка и диагностика*. – 2023. – № 6. – С. 41–46.
14. Nescoromniy S. V. Pulsed thermo-induction-dynamic welding and pressing of dissimilar materials / S. V. Nescoromniy, E. L. Strizhakov // *Welding International*. – 2023. – Vol. 37, No. 3. – P. 128-134. – DOI 10.1080/09507116.2023.2196452.
15. Стрижаков, Е. Л. Разработка разрядно-импульсного оборудования для прикладных исследований процессов магнитно-импульсной сварки / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, С. О. Агеев, С. В. Лемешев // *Сварочное производство*. – 2015. – № 10. – С. 44–48.
16. Пат. 32713 Российская Федерация, МПК⁷ B21D 26/14. Установка для магнитно-импульсной обработки металлов / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Хахин, М. Ю. Бацемакин, Д. С. Хохлов. – № 2003108069/20; заявл. 27.03.03; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.
17. Стрижаков, Е. Л. Разрядно-импульсная обработка материалов / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Д. В. Минько. – Ростов н/Д : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 204 с.