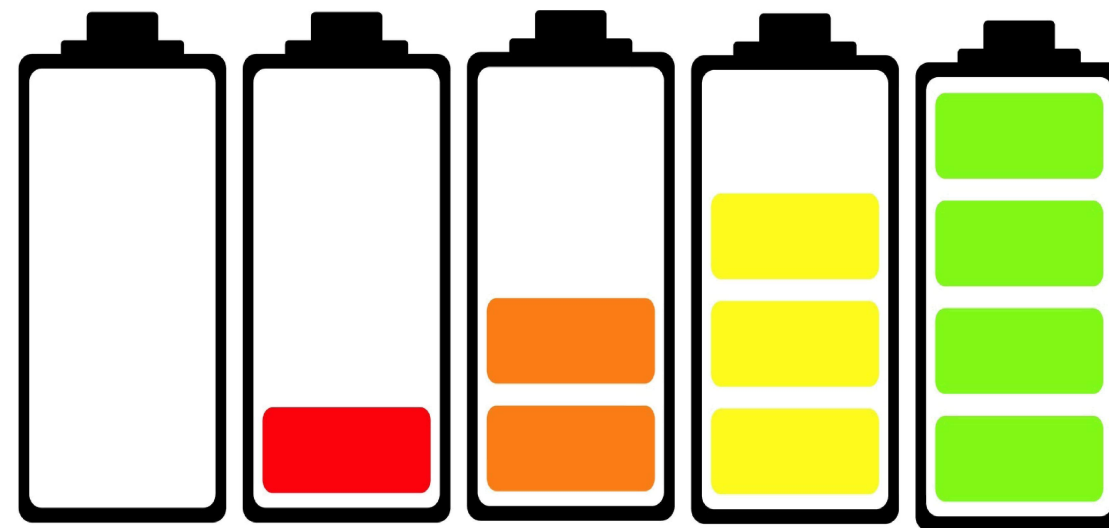


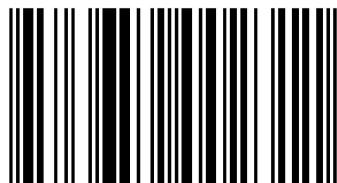
В монографии изложены физические основы конденсаторных способов сварки и технические решения, используемые в разработанных авторами комбинированных процессах магнитно-импульсной обработки. Импульсную сварку с использованием магнитных полей предлагается совмещать с формообразованием, вакуумно-термической обработкой, ударной осадкой. Монография предназначена для студентов, аспирантов и специалистов сварочного производства, изучающих прогрессивные импульсные процессы соединения материалов в твердой фазе.

Станислав Нескоромный, Евгений Стрижаков



### Станислав Нескоромный

Нескоромный Станислав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, ДГТУ, заместитель декана факультета "МТиО", г.Ростов-на-Дону. Стрижаков Евгений Львович, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», ДГТУ, г.Ростов-на-Дону. Направление исследований-магнитно-импульсная обработка и сварка.



978-3-659-00231-1

Станислав Нескоромный, Е. Стрижаков

Станислав Нескоромный  
Евгений Стрижаков

## Специальные процессы магнитно- импульсной сварки

Описаны разновидности импульсных способов сварки, применяемая оснастка, инструмент-индуктора, оборудование и технология

LAP **LAMBERT**  
Academic Publishing

## ВВЕДЕНИЕ

При создании новейших изделий авиационной, космической и электронной техники, в приборостроении, строительстве используются сварные тонкостенные трубчатые конструкции, облицовочные композиционные покрытия и соединения стержневых деталей с корпусными. Применение традиционных методов сварки, в таких случаях, часто бывает не возможно или экономически не эффективно. Целесообразно использование высокопроизводительных импульсных методов обработки, в частности магнитно-импульсной сварки (МИС). Однако, традиционной МИС с косым соударением получить тонкостенные, облицовочные и стержневые конструкции так же не возможно. Необходимо, используя уникальные свойства магнитно-импульсной обработки, совмещать импульсную сварку в твердой фазе с формовкой, вакуумно-термической обработкой и ковочной осадкой.

В монографии изложены физические основы и технические решения, используемые при создании комбинированных методов магнитно-импульсной сварки. Данные процессы значительно расширяют возможности применения в технологических целях импульсных магнитных полей.

Впервой главе приведено описание импульсных процессов сварки с использованием емкостных накопителей энергии. Особое место среди них занимает традиционная магнитно-импульсная сварка, схема которой широко использовалась в разработках КуАИ им. Королева, ИЭС им. Патона, ИАЭ им. Курчатова, НИИТОПа и других организациях.

Для изготовления облегченных корпусов электросоединителей специалисты космического центра им. Хруничева и ДГТУ разработали технологию и оборудование позволяющее использовать одновременно магнитное давление, как для штамповки, так и для сварки. Во второй главе изложены результаты исследований совмещенного процесса и рекомендации по разработке инструмента и оснастки.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и

теоретических исследований процессов сварки и прессования в вакууме эмиссионных покрытий. Облицовочные соединения осесимметричных узлов получены радиальным магнитным давлением с предварительным разогревом в контролируемой среде. Комбинированная вакуумнотермическая и магнитно-импульсная обработка позволяет значительно сократить цикл изготовления композиционных узлов изделий электронной техники.

Четвертая глава посвящена поисковым исследованиям ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом. Разряд батареи конденсаторов обеспечивает пропускание тока и импульсное механическое воздействие на зону соединения стержневых деталей с корпусными. Тепловое и силовое воздействие синхронизированы за счёт того, что зона сварки и индуктор магнитно-импульсного воздействия включены последовательно в цепь разряда емкостного накопителя.

Последняя глава посвящена проектным изысканиям, связанным с созданием промышленного спецтехнологического разрядно-импульсного оборудования. Изложен алгоритм выбора и расчёта параметров обработки, приведены схемы высокопроизводительных многоканальных и карусельных устройств магнитно-импульсной обработки.

## **Глава 1. Импульсные методы конденсаторной сварки**

Одним из самых распространённых импульсных процессов является конденсаторная сварка [14].

Благодаря специфическим особенностям разряда конденсаторов, сварка металлов с помощью аккумулированной в них энергии имеет ряд энергетических и, что ещё более важно, технологических достоинств. Основным энергетическим достоинством является малая установочная мощность сварочного оборудования, так как время разряда конденсаторов значительно меньше времени их зарядки. Мощность, выделяемая при импульсном разряде во много раз больше мощности, потребляемой из сети.

Технологические достоинства конденсаторной сварки связаны с высокой точностью дозирования энергии в конденсаторах и с кратковременностью их разряда (в среднем от нескольких десятых долей до 10-20 мкс). Последнее легко позволяет соединять металлы, имеющие разные теплофизические свойства, а также существенно различные толщины (или диаметры). Конденсаторная сварка благодаря точному дозированию энергии, при прочих равных условиях, обеспечивает стабильность качества соединений.

В настоящее время применяются несколько принципиально различных способов конденсаторной сварки: сварка сопротивлением трансформируемым разрядом конденсаторов; сварка сопротивлением непосредственным разрядом конденсаторов; дуговая конденсаторная сварка; магнитно-импульсная сварка; ударная конденсаторная сварка [1, 6, 14].

### **1.1. Ударная конденсаторная сварка**

В процессе ударной конденсаторной сварки (УКС), в одних случаях теплота выделяется при прохождении сварочного тока через контакт, в других - в дуге, горящей при разряде конденсаторов. На разных стадиях могут использоваться различные виды выделения тепла, а, варьируя параметрами

обработки, можно получать соединения в жидкой и твёрдой фазе.

Основной отличительной особенностью УКС является наличие, не зависимо от того был ли предварительный контакт или имелся исходный зазор, взаимного перемещения свариваемых деталей. Это перемещение обеспечивает осадку деталей в конце процесса. Принципиальная схема УКС приведена на рис. 1 [6].

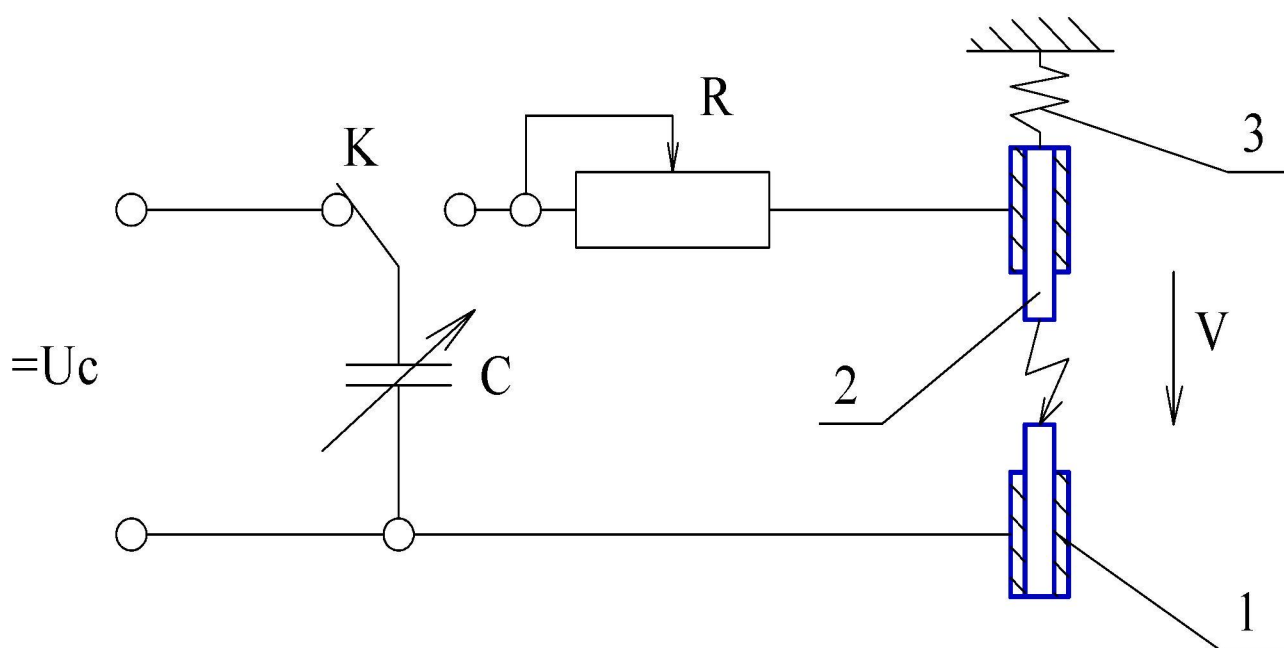


Рис. 1. Принципиальная схема УКС.

Конденсатор  $C$ , заряженный до выбранного напряжения  $U_c$ , подключен через переменное сопротивление  $R$  (при правом положении ключа  $K$ ) к деталям, одна из которых 1 укреплена неподвижно, а другая 2 перемещается со скоростью  $V$  под действием пружины 3 из положения, в котором удерживалась каким-либо способом, до соударения с первой деталью.

УКС имеет преимущества перед другими способами конденсаторной сварки, обусловленные наличием такого специфического высококонцентрированного источника нагрева, как дуга, горящая при разряде конденсаторов. К таким преимуществам относятся: во-первых, практическая независимость качества сварного соединения от состояния свариваемых поверхностей, т. е. наличия или отсутствия на стыкуемых поверхностях окисных плёнок, металлических или оксидных токопроводящих покрытий,

жировых плёнок и т. п. при условии, если их толщина менее 0,05 мм) и, во-вторых, возможность соединений при сварке проволок диаметром до 2-3 мм весьма значительного числа сочетаний разнородных металлов (гораздо больше, чем любым другим способом сварки).

Процесс УКС в общем случае можно разделить на три стадии: возбуждение дуги; её горение, во время которого происходит нагрев стыкуемых поверхностей и их очистка от плёнки оксидов и адсорбированных газов, и осадка свариваемых деталей, при которой в зависимости от удельного усилия расплавленный металл полностью или частично удаляется из зоны стыка. Возбуждение дуги при УКС происходит в результате пробоя воздушного промежутка.

Предварительные расчеты и эксперименты показали, что с увеличением напряжения зарядки конденсаторов и уменьшения их ёмкости резко сокращается время разряда конденсаторов, существенно возрастает скорость ввода энергии в разрядный (дуговой) промежуток, уменьшается масса расплавленного металла.

Малое время процесса УКС (обычно не превышающее 3-6 мкс) позволяет успешно соединять разнородные металлы (сталь - алюминий, сталь - латунь, сталь - вольфрам). Высокое давление паров в дуге при УКС создает естественную защиту зоны сварки от воздействия окружающей атмосферы, благодаря чему цветные металлы и их сплавы могут свариваться без применения защитных газов.

Плотность тока протекающего через контакт, составляет  $10^5$ - $10^6$  А/см<sup>2</sup>. Это приводит на второй стадии процесса к практически моментальному взрывообразному испарению контакта. Нагретые до нескольких тысяч градусов молекулы легко ионизируются в электрическом поле, напряженность которого в зазоре между деталями превышает 1000 В/см. Возбуждается импульсная дуга. Эта стадия процесса длится 3-6 мкс, в течение которых происходит оплавление стыкуемых поверхностей. Дуговой промежуток при взрыве и горении импульсной дуги заполняется парами свариваемого металла, находящимися

под высоким давлением [15].

Дуговая стадия разряда длится до тех пор, пока давление паров не снизится до значения, несколько меньшего, чем усилие пружины.

Если усилие, передаваемое пружиной детали, не превышает определенного значения, расплавленной дугой металл лишь частично выплёскивается из сварочной ванны и соединение происходит за счёт совместной кристаллизации металла. При увеличении давления сварка очищенных поверхностей осуществляется в твёрдом состоянии.

Особый интерес представляет вопрос оценки давления паров металла в искровом разряде при УКС. Исследователи [16] обнаружили экспериментально и расчётным путем торможение механизма соударения силами, возникающими в импульсной дуге. Ими могли быть электромагнитные силы или силы электрического поля, а также механические воздействия, обусловленные увеличением плотности газа в искровом промежутке при испарении свариваемых материалов. При плотностях тока  $10^5$ - $10^6$  А/см<sup>2</sup> выделяющаяся на электродах весьма большая энергия не успевает заметно рассеяться и передаётся очень небольшому по размеру участку поверхности металла, в результате этого он взрывообразно испаряется. Испарение металла электродов в этот период происходит в виде струй или факелов, имеющих скорость истечения несколько тысяч метров в секунду. Качественный расчёт показывает, что давление в области контакта может достигать 100 МПа. Как было установлено многочисленными исследователями искрового разряда, струи пара, или факелы, распространяются нормально к поверхности электродов и могут механически воздействовать на противоположный электрод, а так же создать реактивное давление на поверхность испарения [17].

Для определения происхождения сил, создавших повышенное давление в дуге, и порядка величины этого давления Р. Хольм был поставлен эксперимент с маятниковым механизмом.

Эксперименты показали, что угол отклонения маятника, соответствующий среднему усилию, действующему на электроды, не зависит

от диаметра проволоки. Это свидетельствует о слабом влиянии на давление электромагнитных и электростатических сил, пропорциональных плотности тока.

При обработке полученных данных выявлена прямо пропорциональная зависимость между средними силами, действующими на электроды,  $F_{\text{ср}}$  и квадрата тока  $I_{\text{ср}}^2$  (см. рис. 2).

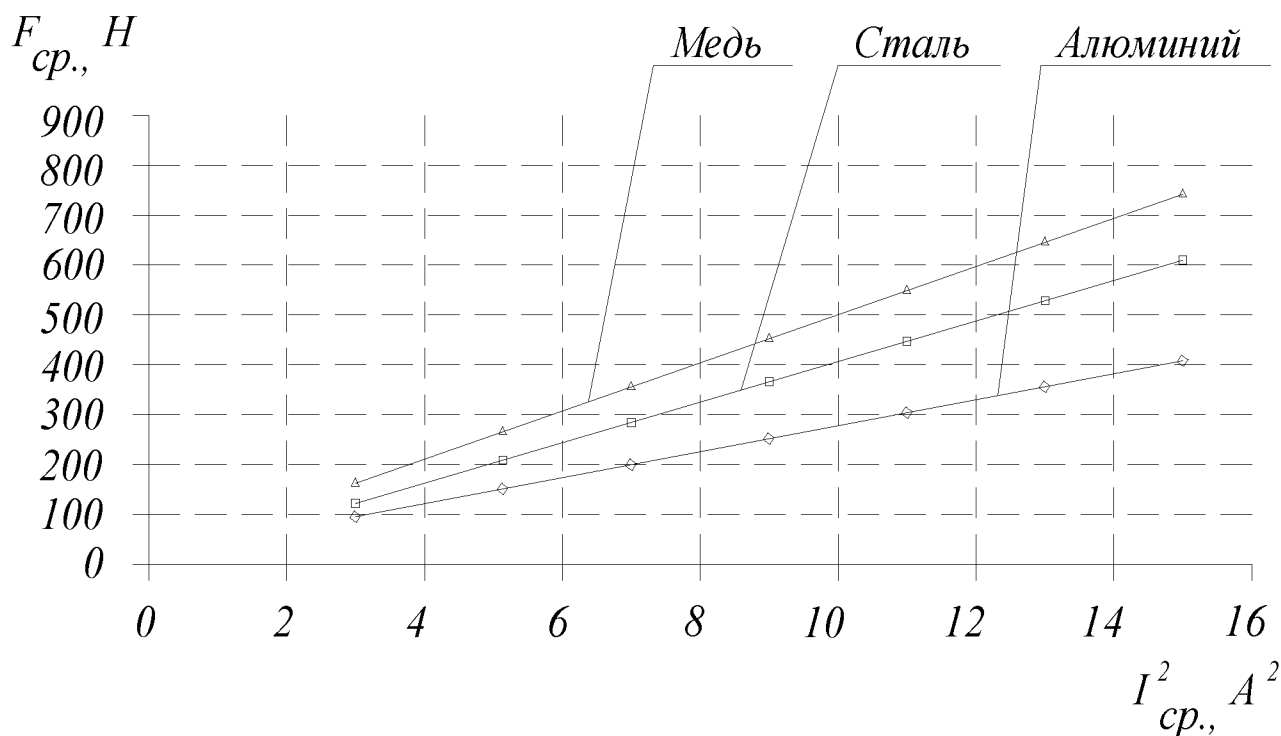


Рис. 2. Зависимость средних сил, действующих на электроды,  $F_{\text{ср}}$  от квадрата среднего значения сварочного тока  $I_{\text{ср}}^2$ .

Таким образом была доказана преобладающая роль паров свариваемых металлов в повышении давления в импульсном разряде.

Полученные результаты позволили предложить расчётную формулу для оценки давления, которые появляются в импульсном дуговом разряде и воздействует на свариваемые поверхности:

$$P_{\text{п.м.}} = \frac{28 \cdot I^2}{r}, \quad (1)$$

где  $r$  – теплота испарения материала, Дж/кг.



Для алюминиевых электродов давление паров импульсной дуги  $P_{п.м.}$  оказалось равным примерно 30 МПа, для стали – 44 МПа, для меди – 52 МПа.

Столь высокие значения давления паров в импульсной дуге и сил их воздействия на электроды, даже за малое время разряда, обуславливают импульсы, способные значительно изменять количество движения при соударении. Возможны даже остановки или изменения направления движения электрода на обратное. Полученные данные применимы для разряда конденсаторов в различных условиях: между сближающимися или расположенными в начальный момент без зазора электродами [6].

При всех достоинствах УКС, в частности, отсутствие необходимости предварительной очистки соединяемых поверхностей, имеется существенный недостаток - силовое воздействие осуществляется специальным пружинным механизмом. Перспективно использование для целей магнитного давления, возникающего при индукционной обработке, в частности, индукционной сварке [4, 5].

## **1.2. Технология сварки импульсной дугой**

В данном разделе речь идет о технологии крепления стержневых элементов с использованием энергии, запасенной в конденсаторе (CD Stud Welding) [81].

Различают технологию CD Stud Welding с предварительным подъемом крепёжного элемента и с предварительным контактом.

Технология крепления стержневых элементов с предварительным подъемом рис. 3 заключается в следующем. Привариваемый крепёжный элемент (рис. 3,а) устанавливается в сварочный пистолет, снабженный пружинной или гидравлической системой подъема/опускания, позиционируется и прижимается к поверхности. На торце крепёжного элемента изготавливается микровыступ.

Одновременно с разрядом батареи конденсаторов происходит подъем

стержня вверх (рис. 3,б). Образуется дуговой разряд (рис. 3,в), который оплавляет микровыступ шпильки и часть поверхности плоской детали. Опускание шпильки в сварочную ванну (рис. 3,г) сопровождается совместной кристаллизацией и образованием сварного соединения в жидкой фазе.

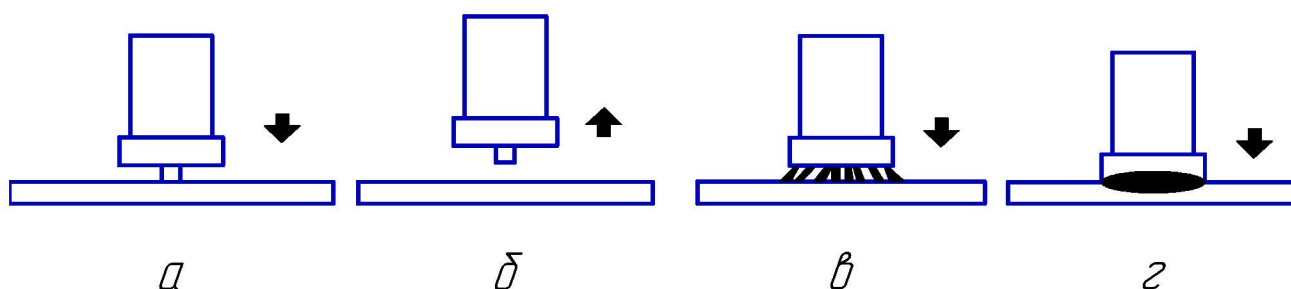


Рис. 3. Технология CD Stud Welding с предварительным подъёмом крепёжного элемента.

Сущность технологии CD Stud Welding с предварительным контактом рис. 4 заключается в следующем. Привариваемый крепёжный элемент устанавливается в сварочный пистолет, позиционируется и прижимается к поверхности (рис. 4,а). Энергия, накопленная в батарее конденсаторов, проходит через микровыступ (рис. 4,б), образуется дуговой разряд, который оплавляет торец крепёжного элемента и плоской детали. Опускание крепёжного элемента в сварочную ванну (рис. 4,в) сопровождается совместной кристаллизацией и образованием сварного соединения в жидкой фазе.

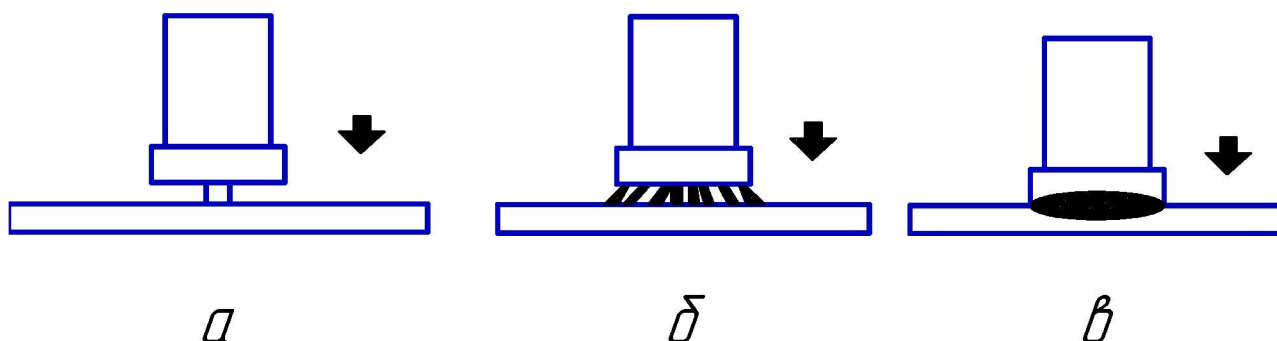


Рис. 4. Технология CD Stud Welding с предварительным контактом.

Перед сваркой источник питания подключают к сети и производят

зарядку конденсаторной батареи большой емкости (от 12мкФ до 150мкФ). Зарядное напряжение до 500 В, величина сварочного тока при этом достигает 5000 А.

Существенными недостатками данной технологии является отсутствие силового воздействия во время сварки, получение сварного соединения в жидкой фазе, что нежелательно при сварке цветных металлов и их сплавов и разнородных материалов.

### **1.3. Магнитно-импульсная сварка с косым соударением**

На использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенных в стенках обрабатываемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля и самим магнитным потоком импульса основывается магнитно-импульсная обработка (МИО) металлов. В отличие от других известных методов деформирования при МИО электрическая энергия непосредственно преобразуется в механическую, а импульс давления магнитного поля действует непосредственно на заготовку без участия какой-либо передающей среды. Деформирование можно осуществлять как в вакууме, так и в любой не препятствующей распространению магнитного поля среде [3]. В технологических целях использованием импульсных магнитных полей занимаются в МГТУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона, ДГТУ и других организациях. Все они объединены в международную ассоциацию магнитно-импульсной обработки [7]. На Западе наиболее известны разработки фирмы «Максвелл» США. Принципиальная схема МИО приведена на рисунке 5.

О магнитно-импульсной сварке (МИС) первое упоминание имеется в патенте Давида Ф. Броуэра [8], в котором автор патентует метод формовки и устройство для его осуществления. По Броуэру сущность сварки заключается в следующем. Свариваемые детали устанавливаются с постоянной величиной зазора  $\delta$  между ними. Зону сварки герметизируют кожухом, и создают в ней нейтральную атмосферу.

С помощью индуктора от генератора токов высокой частоты детали

нагреваются перед сваркой, после чего на этот же индуктор подаётся импульс тока от магнитно-импульсной установки. Отталкивающие усилия возникают в результате взаимодействия магнитных полей индуктора и μεταемой детали, в результате которых эта деталь метается в направлении неподвижной детали, и происходит их сварка.

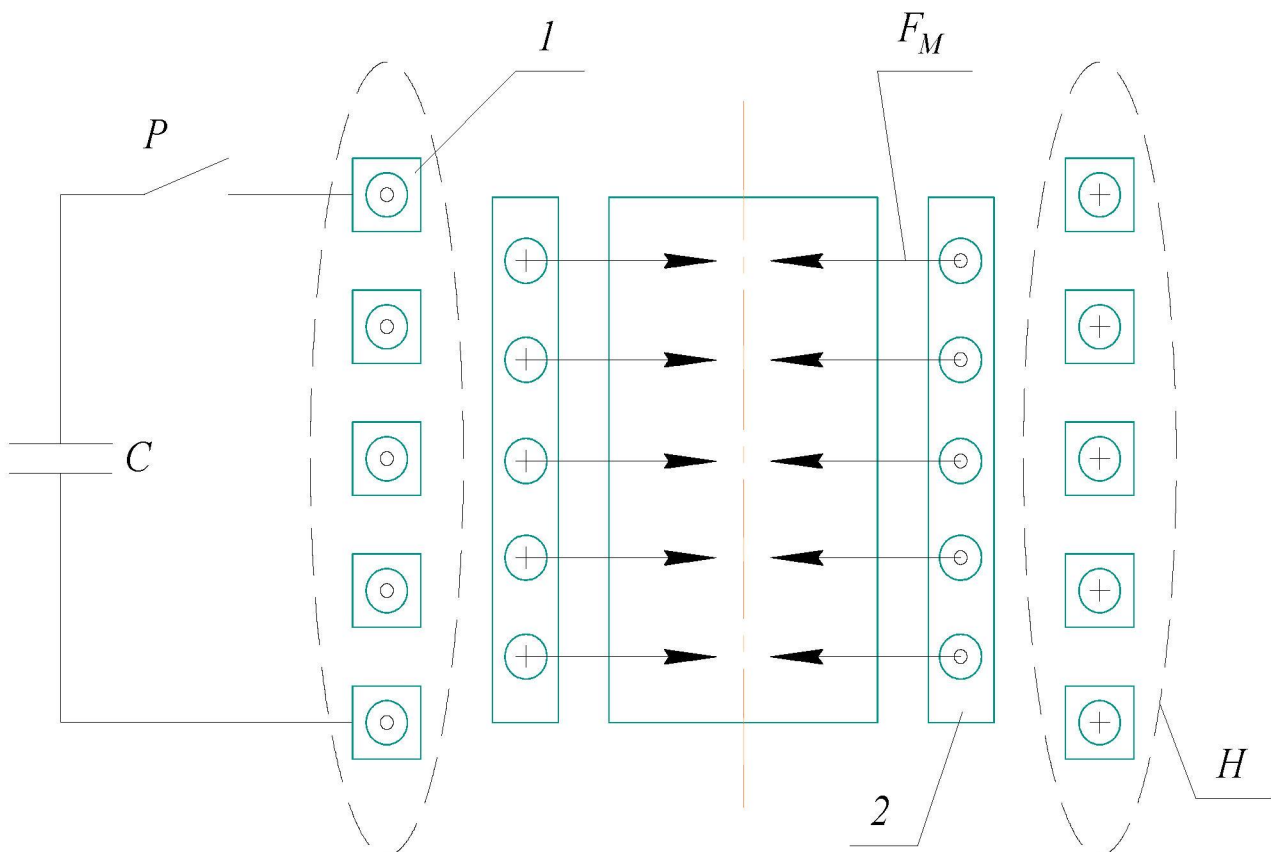


Рис. 5. Принципиальная схема магнитно-импульсной обработки металла.

С – накопительный блок; Р – разрядник; 1 – индуктор; 2 – обрабатываемая деталь;  $F_M$  – магнитное давление; Н – силовые линии магнитного поля  $\oplus$   $\odot$  – линии разрядного и индуцированного тока.

Новая схема магнитно-импульсной сварки (МИС) описана в работе [1]. Технологические схемы этого процесса приведены на рисунке 6.

Детали 1 и 2, согласно разработанному способу, устанавливаются под острым углом  $\alpha$  внахлестку друг к другу и с зазором  $\delta$  между ними. На поверхности противоположной свариваемой устанавливаются индуктор 3.

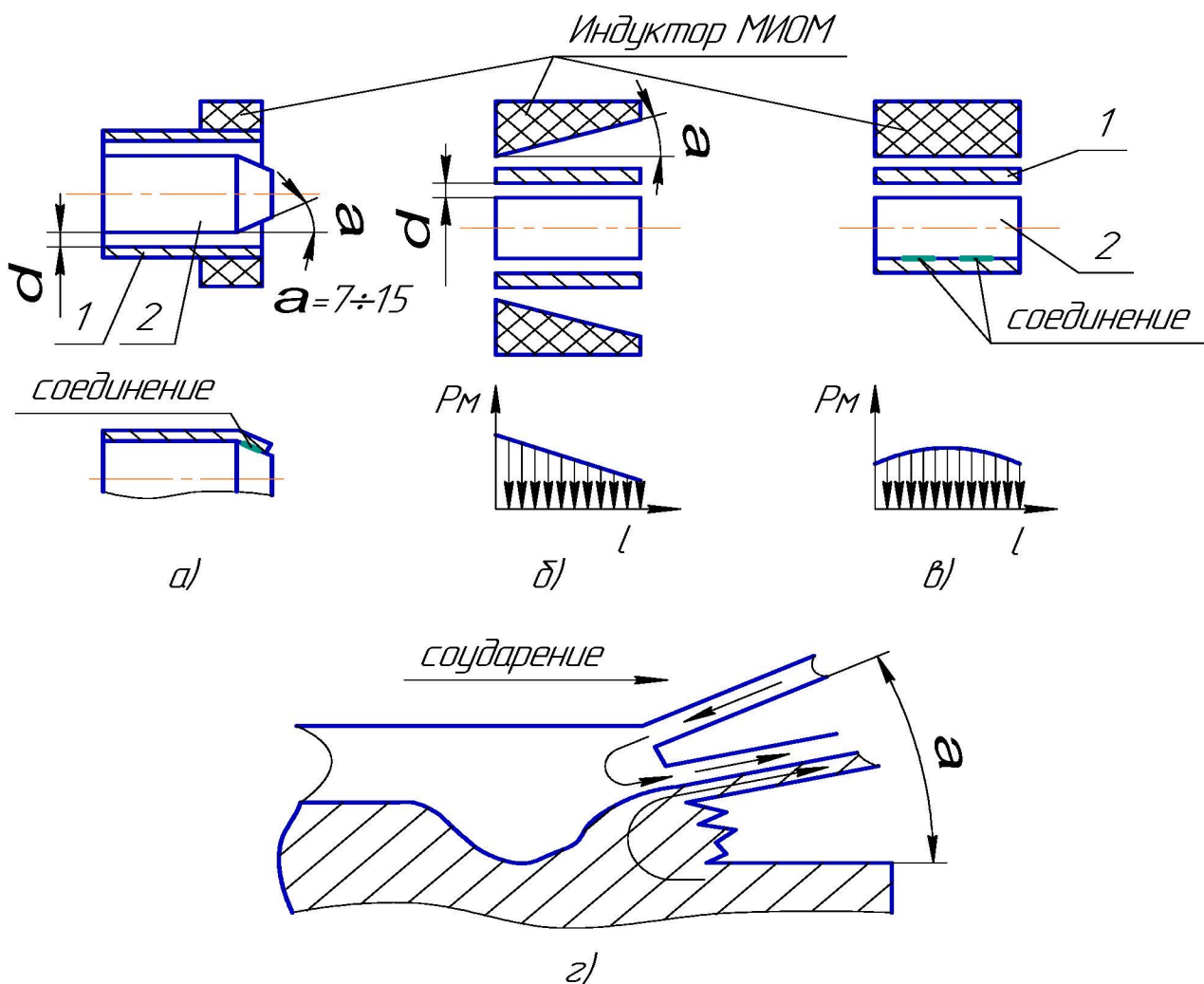


Рис. 6. Технологические схемы магнитно-импульсной сварки.

а) с расположением деталей под углом; б, в) с изменяющимся вдоль зоны обработки магнитным давлением; г) образованием кумулятивной струи;  $\alpha$ ,  $\delta$  – исходный угол и зазор;  $P_m$  - магнитное давление.

В опоре 7 жёстко закрепляют деталь 1 для предотвращения перемещения при сварке. Закрепление детали 2 должно обеспечить перемещение свариваемого конца в направлении детали 1. Индуктор 3 присоединяется своими выводами к генератору импульсных токов. После зарядки батарей конденсаторов от зарядного устройства до заданного напряжения включается коммутирующее устройство, которое замыкает батарею конденсаторов на индуктор. В зазоре между индуктором и заготовкой при разрядке батареи конденсаторов возникает сильное магнитное поле, индуктирующее в этой заготовке ток. Силы

отталкивания между индуктором и деталью 2, возникают в результате взаимодействия тока индуктора с индуцированным током в заготовке, в результате этого деталь 2 мгновенно с большой скоростью перемещается от индуктора в направлении неподвижной детали 1; в зоне контакта при соударении развиваются высокие давления, и происходит образование сварного соединения.

В отличие от способа Броуэра сварку можно осуществлять на воздухе без предварительного подогрева как плоских так и трубчатых деталей. Одну из свариваемых деталей для сварки разнородных материалов можно предварительно нагреть. В частности, для телескопического соединения стальной и алюминиевый конец одной из труб выполняют коническим, а стальную трубу предварительно нагревают [8].

Институтом электросварки им. Е. О. Патона разработан способ магнитно-импульсной сварки разнородных труб различных диаметров и различных толщин стенок, этим способом сваривают трубы - переходники из нержавеющей стали и алюминия, меди и алюминия. Прочность сварных соединений близка к прочности цельной алюминиевой трубы. Исследования МИС с предварительным расположением свариваемых поверхностей деталей под углом друг к другу и зазором между ними проведены в ряде последующих работ.

Магнитно-импульсной сваркой можно получать нахлесточные соединения равно - и разнотолщинных тонкостенных труб.

Примеры осуществления магнитно-импульсной сварки приведены на рисунке 7. Индуктор устанавливают внутри или снаружи трубчатой детали [20].

По первому варианту (рис. 7,а) труба 1 с отформованным усеченным на конус концом вставляется в другую трубу 2 или отверстие детали зазором между свариваемыми поверхностями. Перед сваркой соединяемые поверхности обезжиривают и зачищают. Снаружи на трубу 2 для предотвращения её деформации при сварке надевается металлическая обойма 4. При достаточной жёсткости детали 2 сварку осуществляют без обоймы. Внутри трубы 1 в зону

усеченного конуса вставляют индуктор 3, подсоединенный к магнитно-импульсной установке.

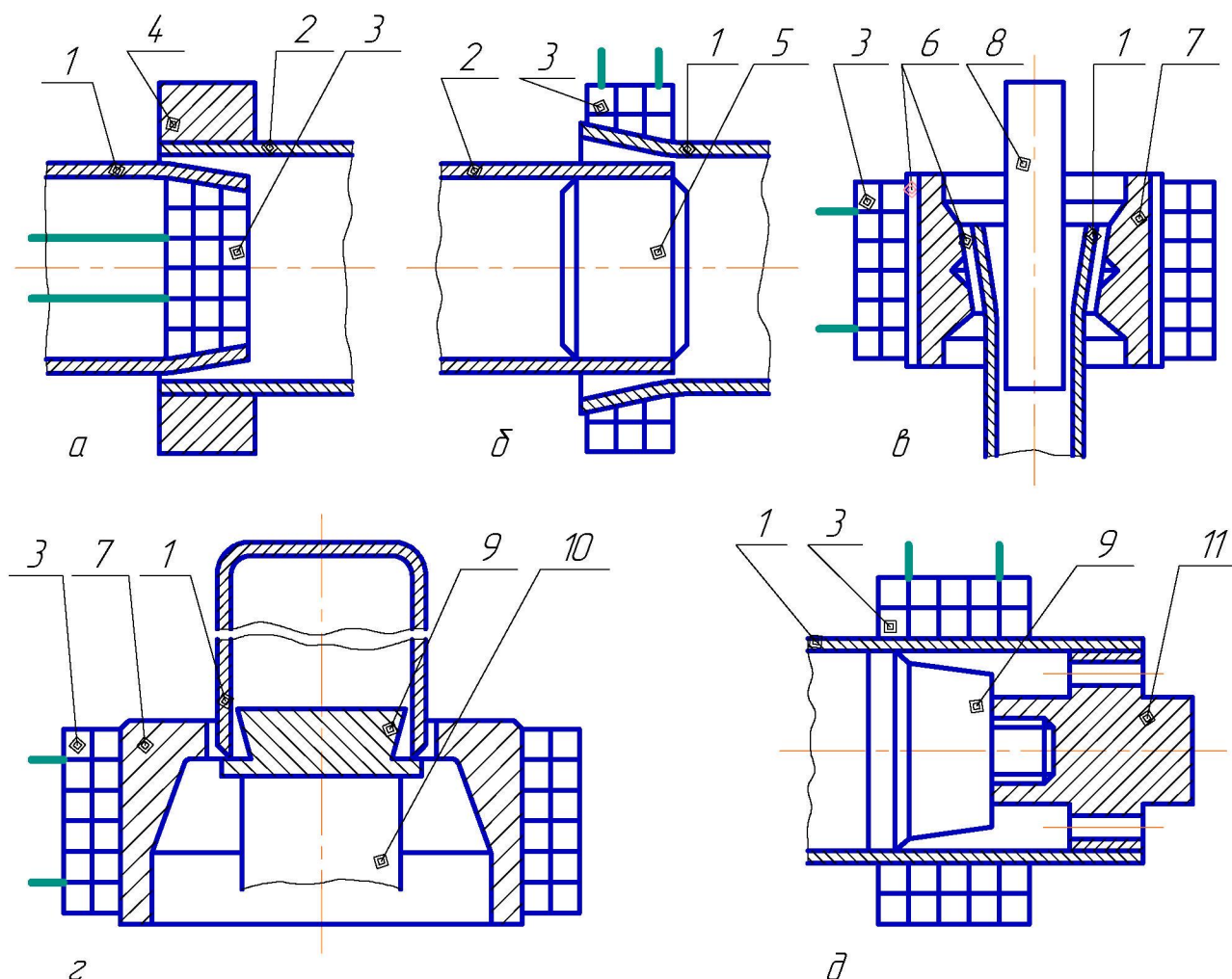


Рис. 7. Примеры осуществления магнитно-импульсной сварки при расположении свариваемых поверхностей под углом и с зазором между ними.

По первому варианту можно сваривать тонкостенные трубы, разнотолщинные трубы, когда тонкостенная труба расположена внутри, а также тонкостенные трубы с охватывающими конструктивными деталями (фланцами и др.).

По второму варианту (рис. 7,б) трубу 1 с конусной отбортовкой на конце надевают на другую трубу 2 или цилиндрический стержень с зазором между предварительно обезжиренными и зачищенными свариваемыми

поверхностями. Для предотвращения смятия трубы 2 в процессе сварки внутрь её без зазора вставляют металлическую оправку 5, удаляемую после сварки. В случае если неподвижная труба достаточно жёсткая, чтобы выдержать давление при сварке без остаточных деформаций, необходимость в оправке отпадает. Снаружи на трубу 1 на участке конусной отбортовки устанавливают индуктор 3.

По второму варианту сварки возможно получение соединений тонкостенных труб, разнотолщинных труб с тонкостенной трубой снаружи, тонкостенных труб со сплошными цилиндрическими деталями (тяги и др.).

Для локализации электромагнитного давления в зоне сварки можно применить концентратор электромагнитного поля 7 – металлический вкладыш с продольной щелью-разрѐзом, изолированный с обеих сторон прокладками 6. Наиболее эффективно применение концентратора 7 при установке его снаружи на трубу, свариваемую со стержнем 8 (рис. 7,в), чем достигается значительно уменьшение длины нахлеста соединяемых деталей.

Типичным примером использования магнитно-импульсной сварки является приварка к стаканам заглушек 9, устанавливаемых на упоры 10 (рис. 7,г) и к трубам (рис. 7,д). Во втором случае к наружной поверхности заглушки крепится съёмная центрирующая вставка 11. Заглушка вместе со вставкой устанавливается в трубу. После сварки центрирующая вставка снимается с заглушки.

Магнитно-импульсной сваркой можно получать качественные соединения однородных и разнородных металлов в воздушной или инертной среде, а также в вакууме с предварительным нагревом свариваемых деталей или без нагрева. Правка соединения и механическая обработка после МИС не нужна. Прочность сварного соединения не ниже прочности материала наименее прочной детали. Соединение герметично, обладает вакуумной плотностью и выдерживает вибрационные нагрузки [1].

Особенностью процесса МИС, отличающий его от других известных способов деформирования, является возникновение деформирующих усилий в



самом металле, поэтому МИС осуществляется без передаточных сред. Эта особенность МИС позволяет воздействовать на свариваемые детали в вакууме, защитной атмосфере и других средах магнитным полем индуктора, расположенного вне этих сред [9].

Давление на метаемую заготовку ограничивается прочностью и долговечностью индуктора; ширина зоны соединения ограничена несколькими десятками миллиметров, поэтому МИС нельзя использовать для плакирования больших поверхностей, всё это относится к недостаткам МИС.

Накапливаемая в батарее конденсаторов энергия сравнительно невелика. Эффективность использования этой энергии на разгон метаемого элемента зависит от правильного расчёта электродинамических сил, действующих на индуктор и деформируемую заготовку. Поэтому важно знать основные параметры процесса магнитно-импульсной сварки металлов.

Запасаемая энергия в батарее конденсаторов является одним из наиболее важных параметров:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2)$$

где  $C$  – емкость конденсатора, Ф;

$U$  – напряжение заряда, В.

При магнитно-импульсной обработке параметры разрядного контура, как правило, подбираются такими, чтобы разряд был колебательным.

Это выполняется, если осуществляется ограничение для активного сопротивления  $r_a$ :

$$r_a < 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3)$$

причём активное сопротивление контура  $r_a$

$$r_a = r_y + r_{и-3}, \quad (4)$$

а индуктивность разрядного контура:

$$L = L_y + L_{и-3}, \quad (5)$$

где  $r_{и-3}$  – активное сопротивление системы индуктор-заготовка;

$r_y$  – активное сопротивление магнитно - импульсной установки;

$L_{и-з}$  – индуктивность системы индуктор - заготовка;

$L_y$  – собственная индуктивность магнитно-импульсной установки в режиме к. з. [1].

Если условие (3) выполняется, то ток в цепи индуктора при разряде конденсаторной батареи может быть определён выражением:

$$I_p = U \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-0,5r_a \frac{t}{L}} \cdot \sin \omega t, \quad (6)$$

где  $t$  – время.

Из (6) следует, что изменение тока имеет характер периодического затухающего разряда с круговой частотой  $\omega$ , определяемой в общем случае соотношением:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}. \quad (7)$$

Зная  $\omega$  можно определить период разряда  $T$ :

$$T = 2 \frac{\pi}{\omega}. \quad (8)$$

Напряженность магнитного поля в любой точке окружающего пространства пропорциональна току разряда:

$$H = k_1 \cdot I_p, \quad (9)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических параметров системы индуктор - заготовка и координат точки.

Давление магнитного поля можно характеризовать плотностью энергии [11]:

$$P_m = 0,5BH, \quad (10)$$

где  $B = \mu H$  – индукция магнитного поля;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды.

Когда значение  $B$  при магнитно-импульсной обработке больше насыщения ферромагнитных материалов,  $\mu$  следует заменить на  $\mu_0$  – магнитную постоянную. Тогда формулу (10) можно записать в следующем виде:

$$P_m = 0,5\mu_0 \cdot H^2. \quad (11)$$

Согласно выражению (11), давление магнитного поля при хорошей индуктивной связи системы индуктор-заготовка прямо пропорционально квадрату разрядного тока:

$$P_m = k_2 \cdot I_p^2, \quad (12)$$

или

$$P_m = k_2 \cdot U^2 \left( \frac{C}{L} \right) \exp\left(0,5r_a \frac{t}{L}\right) \cdot \sin \omega t, \quad (13)$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий соотношение геометрических параметров системы индуктор-заготовка.

В большинстве процессов магнитно-импульсной обработки, в том числе и при магнитно-импульсной сварке, заготовка под действием магнитного поля деформируется, что ведет к изменению  $\omega$  и  $P_m$  вследствие изменения параметров системы индуктор-заготовка. При магнитно-импульсной обработке металлов это значительно усложняет расчёт [10].

Следует стремиться к уменьшению потерь энергии на нагрев установки, индуктора и заготовки, чтобы повысить КПД процесса.

Тепловые потери пропорциональны активному сопротивлению, зависящему от глубины проникновения магнитного поля  $\Delta$ , которая должна быть меньше толщины материала заготовки  $t_3$ :

$$\Delta < t_3. \quad (14)$$

При большой частоте разряда и удельной электрической проводимости материала заготовки глубина проникновения магнитного поля невелика, и ограничивается поверхностным слоем заготовки.

При расчётах активного сопротивления проводника считают, что ток протекает только в слое толщиной  $\Delta$  с равномерной плотностью, а за пределами этого слоя отсутствует.

Точное определение активного сопротивления системы индуктор-заготовка представляет значительные трудности, так как в процессе деформации заготовки вследствие изменения круговой частоты разряда

изменяется толщина скин-слоя  $\Delta$ , а вследствие нагрева проводников изменяется их удельное сопротивление  $\rho$ . Для упрощения расчётов принимают, что весь ток сосредоточен в середине скин-слоя. Расчётный зазор между индуктором и заготовкой в связи с этим можно определить соотношением:

$$Z_p = Z_r + 0,5 \cdot (\Delta_n + \Delta_z), \quad (15)$$

где  $Z_r$  – геометрический зазор между индуктором и заготовкой;

$\Delta_n, \Delta_z$  – глубина проникновения тока для материалов индуктора и заготовки.

Уменьшается активное сечение проводников, следовательно, увеличивается их активное сопротивление, с увеличением круговой частоты разряда  $\omega$ .

Появление ”магнитной подушки”, при магнитно-импульсной сварке в металлическую матрицу тонких заготовок, обусловлено проникновением магнитного поля через заготовку. Объем поля проникшего между свариваемыми поверхностями заготовок или между заготовкой и металлической матрицей, уменьшается с уменьшением зазора между ними [11, 12], в этом и заключается сущность этого явления.

Поскольку общий магнитный поток:

$$\Phi = H \cdot F_n, \quad (16)$$

где  $F_n$  – площадь пронизываемая полем,  $H$  – напряжённость поля в зазоре при деформации заготовки будет увеличиваться и может достичь значений, при которых будет наблюдаться снижение скорости деформирования.

Классической магнитно-импульсной сваркой с косым соударением штампосварные детали сложной конфигурацией и широкополосные облицовочные соединения получить невозможно. Необходимо искать технические решения позволяющие отказаться от косоугольного соударения и совмещать сварку с формовкой.



## **Глава 2. Магнитно-импульсная сварка-формовка (МИСФ)**

### **2.1. Проблемы получения трубчатых деталей сложной формы**

Тонколистовые замкнутые конструкции широко применяют в приборостроении, авиационной и космической технике. Для этих деталей характерны сложный профиль сечения, большие перепады размеров, изменение формы, наличие различных отверстий, рёбер жёсткости и т. д.

Трубчатые детали, в основном, являются корпусными и обеспечивают механическую прочность отдельных частей конструкций при заливке компаундом, но чаще всего, служат для экранировки паяных элементов от радиопомех. Материал, из которого изготавливают тонколистовые трубчатые детали, должен иметь низкую плотность и хорошую электропроводность. Это алюминий, медь, никель, латунь, сталь толщиной 0,1-2 мм.

Конструктивные виды и технические характеристики тонкостенных трубчатых деталей показаны на рисунке 8.

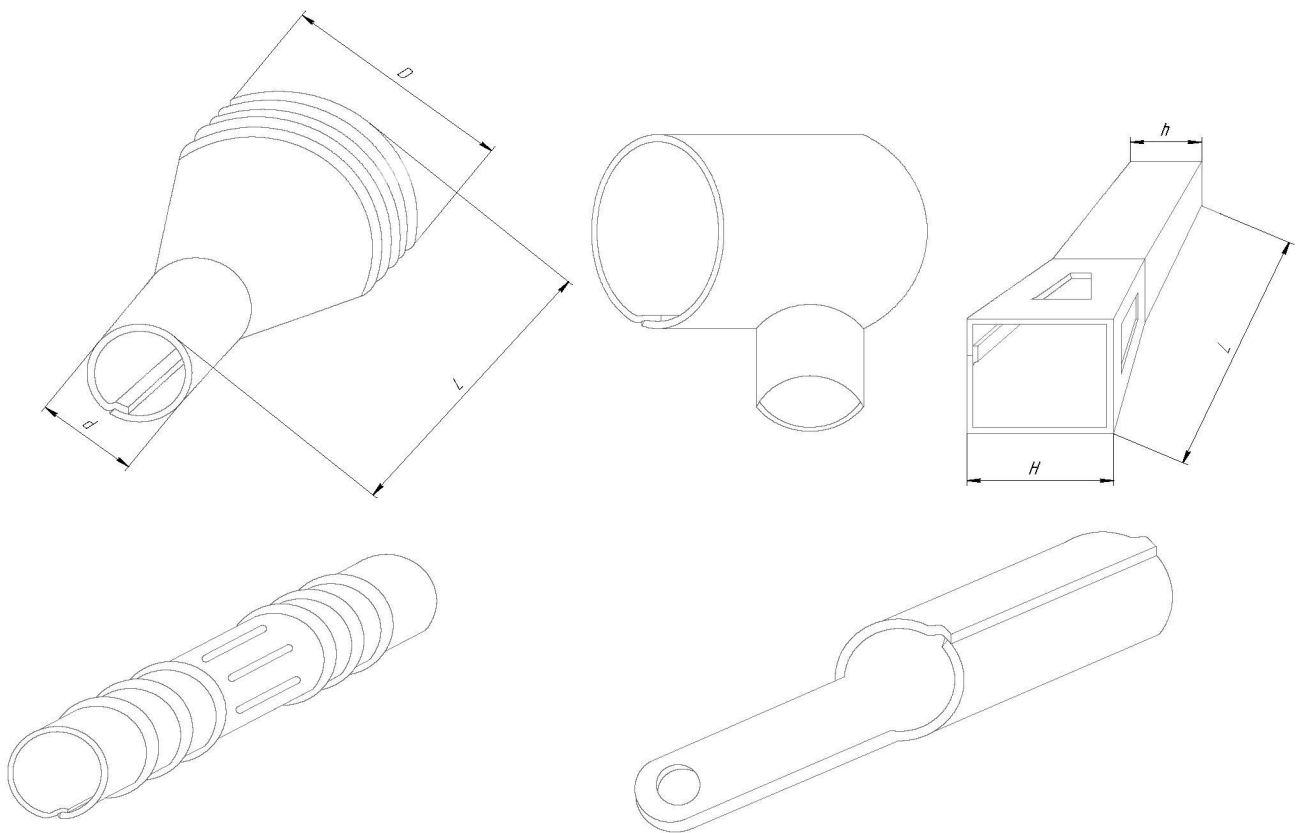
Необходимость использования тонкостенных трубчатых деталей определяет актуальность разработки экономически целесообразной технологии и оборудования для их изготовления. Способы получения тонкостенных трубчатых деталей приведены в таблице 1.

Анализ известных традиционных технологий изготовления таких деталей показал, что они имеют ряд недостатков.

Получение деталей сложной формы из тонколистовых материалов при многопереходной штамповке затруднительно, а иногда невозможно. Сложная, металлоёмкая оснастка, наличие большого количества переходов, не позволяет использовать данный метод в быстропереналаживаемом мелкосерийном производстве.

Полую осесимметричную конструкцию изготавливают с одной установки в пределах одной технологической операции при токарной обработке, однако, есть ограничения по толщине обрабатываемой детали и необходимо

отказываться от рёбер жёсткости. Этот способ отличается низким коэффициентом использования материала (КИМ).



#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. Используемый материал: Cu, Al и их сплавы;
2. Толщина:  $S = 0,1 - 2$  мм;
3. Рабочая температура:  $T^{\circ} C = 300 - 400^{\circ}$ ;
4. Геометрические размеры: Диаметр (ширина):  
 $D(H) \leq 100$ мм;  $d(h) \geq 10$ мм; длина:  $L = 10 - 100$  мм;  $L/D \leq 2$

Рис. 8. Конструктивные виды и технические характеристики тонкостенных трубчатых деталей.

Этого недостатка нет у штампованного варианта. Из листа любой толщины при максимальном коэффициенте использования материала можно получить тонколистовые замкнутые конструкции этим способом. Однако, и в

этом случае, технологическая схема процесса достаточно громоздкая и включает в себя следующие операции: заготовительная, штамповочная, сварочная или пайка, калибровочная, накатка профиля или резьбы и т. д.

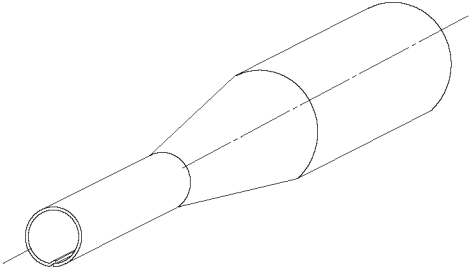
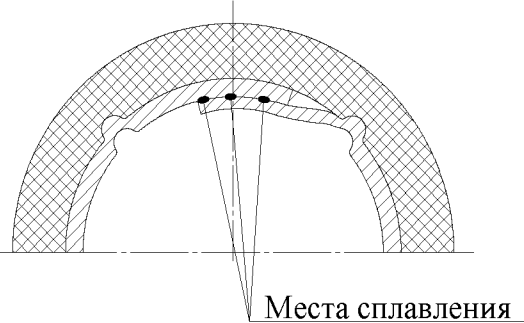
Штамповарные тонколистовые замкнутые конструкции, получаемые пайкой требуют использования сложной оснастки и дефицитных припоев, что делает данный процесс достаточно дорогим. Различные способы изготовления трубчатых деталей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Способы получения тонкостенных трубчатых деталей.

Виды обработок	Расход материала	Трудоёмкость изготовления	Особенности
<p>1. Многопереходная штамповка.</p> 	0,5-0,6	0,3 н. ч.	Трудоёмкость в изготовления, не всегда удаётся получить заданный профиль.
<p>2. Токарная обработка.</p> 	0,1-0,3	0,5 н. ч.	Ограничение по толщине стенки, низкий КИМ.



<p>3. Штамповарные конструкции.</p>  <p>3.1. Штамповка + контактная сварка, пайка (штамповка + пайка), лазерная сварка (штамповка + лазерная сварка), импульсно-дуговая сварка в среде защитных газов (штамповка + ИДС).</p> <p>3.2. Контактная магнитно-импульсная сварка с предварительной формовкой.</p>	<p>0,3-0,9</p> <p>0,9</p>	<p>0,5-1 н. ч.</p> <p>0,1 н. ч.</p>	<p>Прожоги, выплески, смещение заготовки относительно электродов, трудности с позиционированием заготовки, большой процент брака, трудность с получением малого диаметра. Деталь получается в два приёма.</p>
<p>4. Совмещённый процесс магнитно-импульсной сварки-формовки.</p>  <p>Места сплавления</p>	<p>0,9</p>	<p>0,025 н. ч.</p>	<p>Необходимы исследования ?!</p>

Тонколистовые замкнутые конструкции целесообразно изготавливать

сварными. Можно использовать различные виды сварки тонколистовых материалов: импульсная дуговая микросварка неплавящимся электродом в среде аргона, лазерная сварка, контактная сварка в жидкой и твёрдой фазе, индукционная микросварка и т. д.

При получении тонколистовых прецизионных деталей и узлов хорошо зарекомендовала себя лазерная сварка [78]. Однако, необходима сложная, дорогостоящая оснастка при сварке штампованных деталей имеющих сложный профиль.

Герметичное соединение тонколистовых материалов получается при импульсно дуговой сварке, но заказчиков не всегда устраивает внешний вид изделия. Также не всегда обеспечивается качество и функциональное назначение развитых поверхностей.

Различные способы контактной сварки (КС) для получения тонкостенных замкнутых конструкций являются наиболее приемлемыми. В процессе обработки на изделие оказывается как тепловое, так и силовое воздействие. Однако и при использовании контактной микросварки необходима также сложная оснастка.

Все перечисленные выше методы получения штампованных конструкций являются многопереходными процессами, а следовательно требуют больших затрат при организации производства.

Снизить трудоёмкость изготовления тонкостенных замкнутых конструкций может использование контактной магнитно-импульсной сварки [18], позволяющей совмещать процессы штамповки и формирования сварного соединения.

## **2.2. Принцип магнитно-импульсной сварки-формовки (МИСФ)**

В процессе магнитно-импульсной обработки, как при любом виде электрической контактной сварки, имеется тепловое и силовое воздействие на заготовку обеспечиваемое протеканием импульсов электрического тока через

рабочий инструмент - индуктор.

Однако, как было отмечено ранее, использование для получения тонкостенных трубчатых деталей традиционной магнитно-импульсной сварки по схеме с последовательным косым соударением не возможно. Магнитно-импульсная обработка деталей, не имеющих замкнутого контура до настоящего времени вообще не рекомендовалась [3].

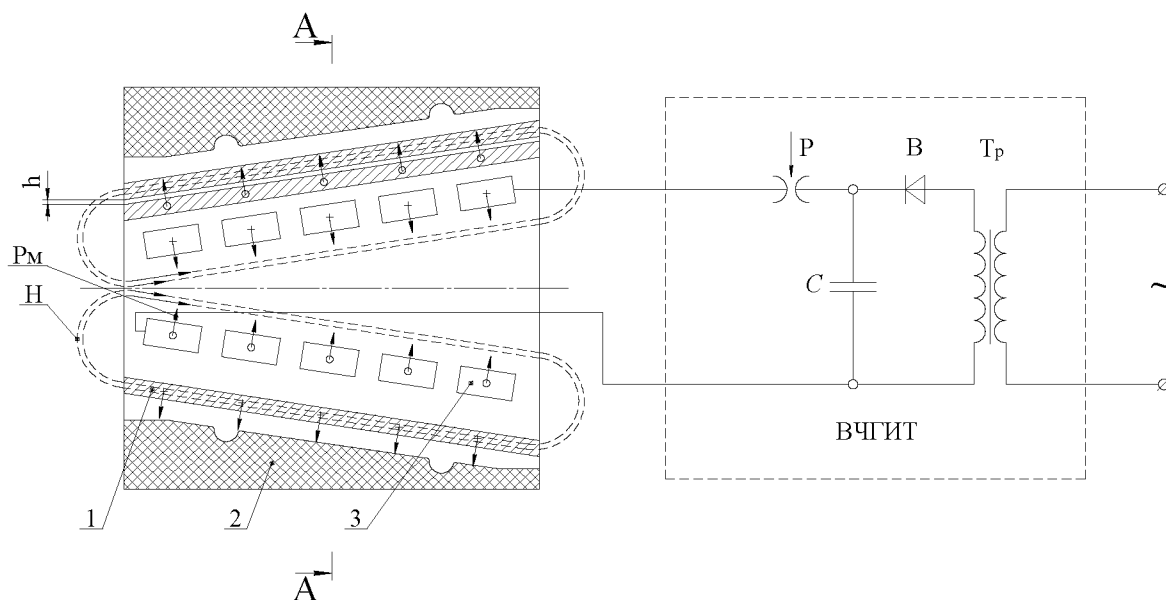
Авторами работ [22, 63] предлагается комбинированный технологический процесс магнитно-импульсной сварки-формовки с исходным зазором. Это позволило отказаться от принципа косоугольного соударения и осуществлять сварку индуцированными токами, проходящими через перехлест кромок заготовки. Магнитное давление используется в качестве сварочного и формующего.

Процесс электрической контактной сварки можно осуществлять в атмосфере с очисткой соединяемых поверхностей выплеском поверхностных загрязнений окисных и адсорбированных плёнок за счёт электроэрозионного эффекта [78].

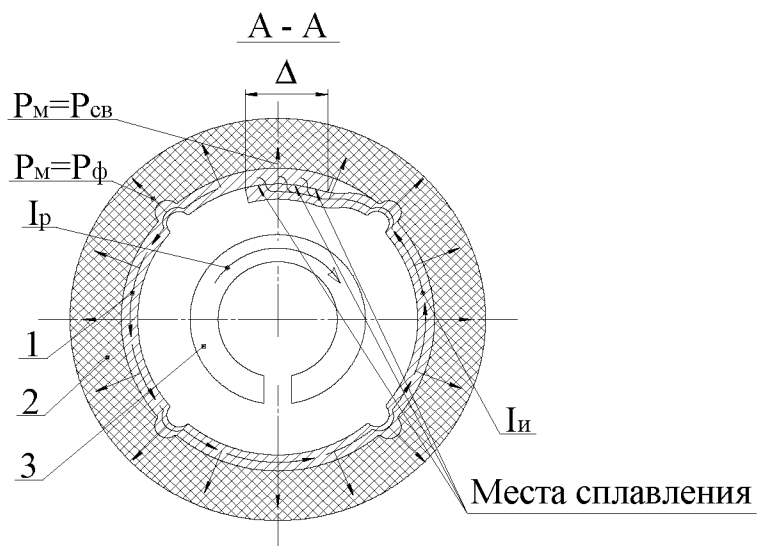
Принципиальная схема МИСФ приведена на рис. 9.

Сущность совмещённого процесса заключается в следующем: предварительно выкроенная тонколистовая заготовка 1 сворачивается с перехлестом  $\Delta$ , и устанавливается в матрицу 2 имеющую форму будущего изделия. В зоне перехлеста имеется исходный зазор  $h$ . В зоне обработки расположен рабочий инструмент-индуктор 3.

При разряде высокочастотного генератора импульсных токов, в индукторе 3 создается высокочастотное (5-100 кГц) электромагнитное поле, под действием которого в свернутой с перехлестом  $\Delta$ , заготовке 1 наводится ЭДС самоиндукции, при этом возникает электрический пробой исходного зазора  $h$ , в результате чего электрическая цепь замыкается. По заготовке 1 протекает индуцированный импульс тока  $I_{и}$  и в зазоре возникает импульсная дуга, которая разогревает и оплавляет противоположные поверхности в зоне перехлеста. Возникающее при взаимодействии индуцированного тока  $I_p$  с



а) Начало процесса



б) Окончание процесса

Рис. 9. Принципиальная схема совмещённого процесса МИСФ.

1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – индуктор;  $h$  – исходный зазор;  $\Delta$  – перехлест; ВЧГИТ – высокочастотный генератор импульсных токов;  $T_p$  – трансформатор; В – выпрямитель; С – конденсаторы; Р – разрядник;  $I_p$  – ток разряда; Н – магнитный поток;  $I_{и}$  – ток индуцированный;  $P_M$  – магнитное давление;  $P_{\phi}$  – давление формовки;  $P_{св}$  – сварочное давление.

магнитным полем индуктора 3 усиливается, деформирует заготовку в сторону

матрицы 2. При этом выбивается вкладыш, определяющий величину зазора  $h$ , из зоны соединения (перехлёста) выдавливается слой расплавленного металла вместе с адсорбированными и окисными плёнками и другими загрязнениями. Разогретые очищенные поверхности сдавливаются, прижимаются к матрице, и происходит контактная электрическая сварка [18, 19].

Магнитное давление  $P_m$  действует на всю поверхность заготовки и осуществляет формовку заготовки в соответствии с конфигурацией матрицы. Таким образом, за один разряд высокочастотного генератора импульсных токов длительностью 10-200 мкс, определяемый типом и толщиной материала, происходит процесс контактной электрической сварки и формовки замкнутых конструкций сложной формы из листового материала.

Данный способ получения штампованных деталей запатентован ДГТУ. Деталь изготавливается с одной установки одним импульсом [63].

В результате теоретических оценок и постановочных экспериментов удалось определить разновидности приёмов магнитно-импульсной сварки. Разновидности приёмов МИС приведены на рис. 10.

Процессы МИСФ различаются: формой кривой разрядного тока (колебательный затухающий или однополярный импульс); наличием или отсутствием предварительной подготовки поверхностей; различными условиями контакта и соударения; частотой разряда, величиной запасённой энергии, которая обеспечивает сварку в жидкой или твёрдой фазе и т. д. [20, 60].

Для реализации в промышленности рекомендуется использовать наиболее просто реализуемый и дающий хорошие результаты, процесс сварки индуцированными токами без предварительной формовки заготовки с затухающим синусоидальным разрядом, без предварительной специальной подготовки соединяемых внахлест кромок, с реализацией сварки в твёрдой фазе, что обеспечивает требуемую прочность и товарный вид трубчатых деталей.



Рис. 10. Разновидности приёмов МИС.

Отличительными особенностями МИСФ от других способов конденсаторной сварки являются:

–локальное оплавление контактных поверхностей, что обеспечивает испарение и удаление поверхностных загрязнений (жировых и окисных плёнок, влаги, адсорбированных включений и т. д.) из зоны сварки;

–объём нагретого металла очень мал, скорость кристаллизации или твёрдофазного взаимодействия очень велика;

–сварочное давление и осадку обеспечивает магнитное давление (силы Лоренца).

Благодаря специфическим особенностям разряда конденсаторов сварка металлов с помощью аккумулированной в них энергии имеет ряд энергетических и технологических достоинств. Можно отметить малую установочную мощность спецтехнологического оборудования - время разряда конденсаторов значительно меньше времени их зарядки, мощность, выделяемая при импульсном разряде, во много раз больше мощности, потребляемой из сети. Технологические достоинства МИСФ связаны с высокой точностью дозирования энергии в конденсаторах, с кратковременностью воздействия (10-100 мкс) и возможностью осуществлять одновременно формовку и сварку.

Кратковременность разряда конденсаторов позволяет локализовать зону нагрева до сварочных температур в небольшом объёме, необходимом для обеспечения достаточной прочности соединения, что позволяет осуществлять сварку на деталях, имеющих окончательную обработку (полированных или с декоративным покрытием), обеспечивая необходимый товарный вид изделия. К преимуществам относится практическая независимость качества сварного соединения от состояния соединяемых поверхностей (если слой загрязнения не превышает 0,05 мм). К достоинствам относятся также, простота реализации силового нагружения, и отсутствие специальных устройств перемещения и осадки.

### **2.3. Анализ процесса МИСФ**

Однако данный высокопроизводительный процесс мало изучен. Для

вскрытия механизма получения нахлесточных соединений с использованием магнитных полей необходимо проанализировать особенности обработки аналогичных импульсных процессов с комбинированным воздействием, таких как ударная конденсаторная сварка, сварка индуцированными токами и т. д.

Основные параметры влияющие на качество соединения определены авторами работы [20, 60]. Установлено, что на качество соединения влияют следующие электрические параметры: ёмкость накопительного блока  $C$ ; рабочее напряжение  $U_p$ ; индуктивность рабочего инструмента, определяемая числом витков индуктора  $N$ . Эти параметры процесса и оборудования полностью определяют энергию  $W$  и длительность воздействия.

Кроме того, на качество соединения влияют следующие геометрические параметры сборки: величина перехлёста  $\Delta$ , зазор  $h$  между соединяемыми поверхностями в исходном состоянии, степень деформации материала при формовке  $\varepsilon_f$  (которая определяется в экспериментальных образцах радиусом формирующей канавки  $r$ ) (см. таблица 2).

Таблица 2

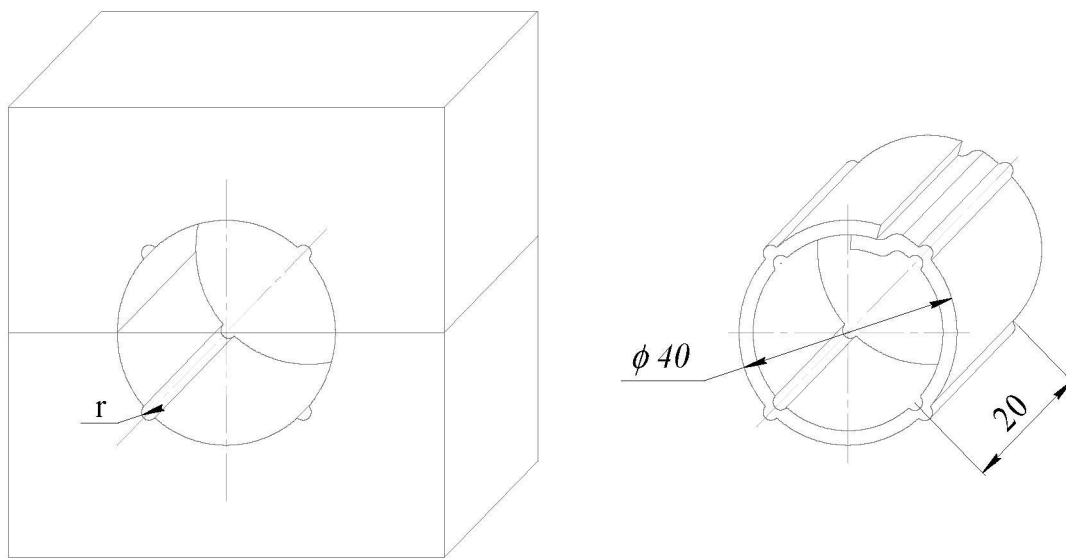
Параметры, влияющие на качество соединения

№	Наименование параметра	Размерность	Область определения
1.	Рабочее напряжение, $U$	кВ	1-15
2.	Ёмкость накопительного блока, $C$	мкФ	3-600
3.	Индуктивность разрядного контура, $L$	нГн	10-50
4.	Число витков индуктора, $N$	вт	1-15
5.	Величина перехлёста, $\Delta$	мм	1-10
6.	Радиус канавки, $r$	мм	0,5-5
7.	Величина зазора, $h$	мм	0,5-1,5
8.	Степень разрежения в технологической камере	Па	133,33-13,33



Осуществлялась схема нагружения "на раздачу", позволяющая исключить коробление тонкостенных трубчатых деталей. В основном цикле экспериментальных исследований для определения влияния деформации на качество сварки было предложено два вида электрических матриц: с продольными и поперечными формирующими "канавками" различной глубины (радиусами  $r$ ) рис. 11.

1. Экспериментальная оснастка с продольными канавками.



2. Экспериментальная оснастка с поперечной канавкой.

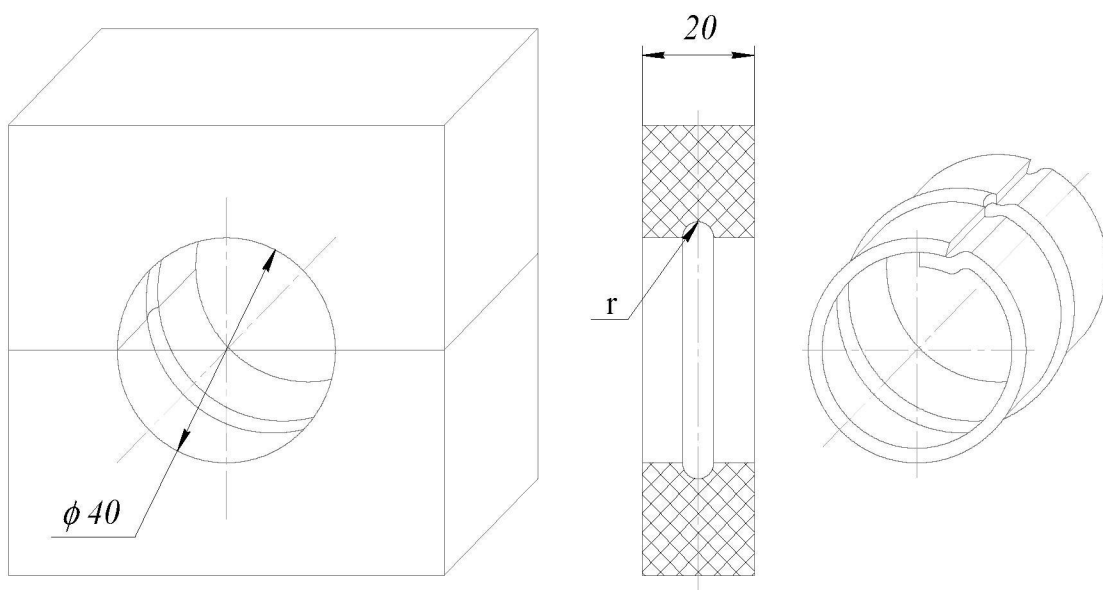


Рис. 11. Экспериментальные образцы и матрицы МИСФ.

Свернутая с перехлестом заготовка помещалась в стеклотекстолитовую матрицу, имеющую рабочее отверстие диаметром 40 мм и длину 20 мм. Диэлектрический материал матрицы был выбран для предотвращения появления, так называемой, "магнитной подушки" [11]. Соответственно, ширина всех экспериментальных образцов составляла значение 20мм, длина же колебалась в зависимости от выбранного перехлёста. Диаметр рабочего индуктора 37 мм позволял укладывать лавсановую изоляцию в зазор между индуктором и заготовкой, длина токопроводной части инструмента, согласно рекомендаций [36], имела величину 30 мм.

Влияние величины перехлёста  $\Delta$  на качество соединения меди и алюминия толщиной 0,5 мм показано на рисунке 12. Режим обработки и параметры оборудования: напряжение на накопителе  $U = 2$  кВ, емкость батареи конденсаторов  $C = 150$  мкФ, число витков индуктора  $N = 5$ . Данный режим обеспечивает необходимую формовку экспериментального образца.

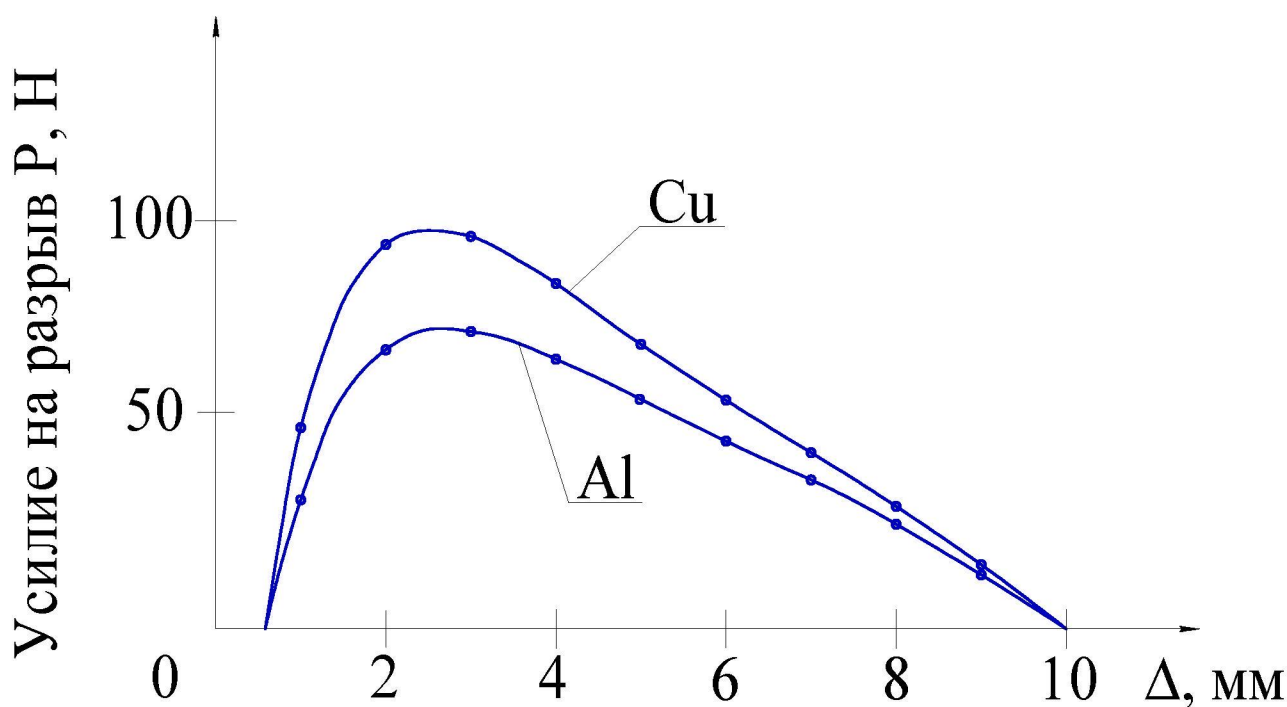


Рис. 12. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от величины перехлёста.

При малых значениях величины перехлёста  $\Delta$  высокая плотность индуцированного тока  $I_{и}$  приводит к прожогам материала. Значительное увеличение перехлёста и, как следствие, уменьшение плотности сварочного тока, не обеспечивает условий сплавления соединяемых поверхностей.

Удовлетворительное качество соединения получено при значениях перехлёста  $\Delta = 3-5$  мм. Аналогичные результаты были получены и при использовании накопителя ёмкостью  $C = 48, 96, 300$  мкФ и различных рабочих напряжениях.

Влияние исходного зазора  $h$  также существенно влияет на механическую прочность соединения.

При значениях зазора от 0,5 до 0,75 мм усилие на разрыв увеличивается. С увеличением зазора от 1 мм и более усилие на разрыв уменьшается. Зависимость усилия на разрыв от величины зазора приведена на рис. 13.

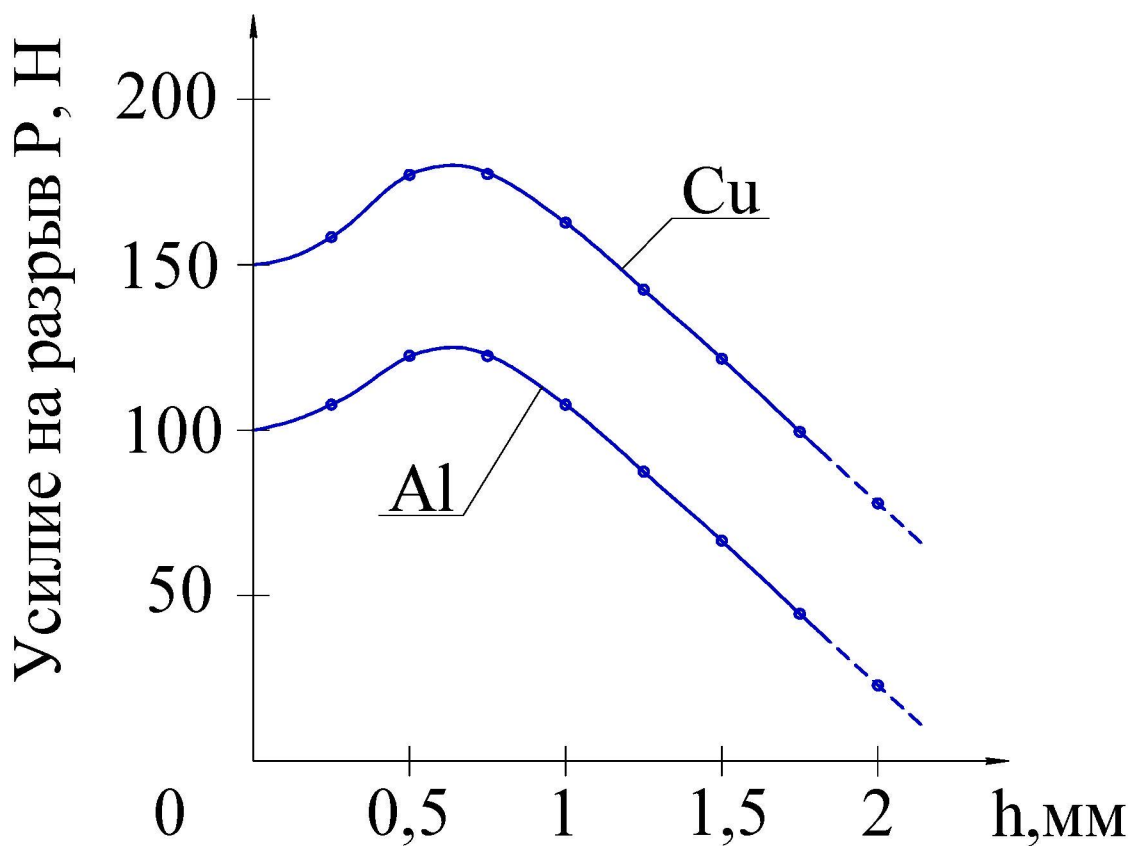


Рис. 13. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от величины зазора

На качество сварки влияет степень разрежения в технологической камере. Проводились эксперименты в вакууме  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  мм. рт. ст. Были получены качественные соединения от энергия импульса 2 кДж (см. рис. 14).

При сварке в вакууме улучшаются условия электроэрозионной очистки, практически отсутствуют места непроваров. Качество соединения лучше, чем в атмосфере, такую технологию можно рекомендовать для получения вакуумноплотных соединений.

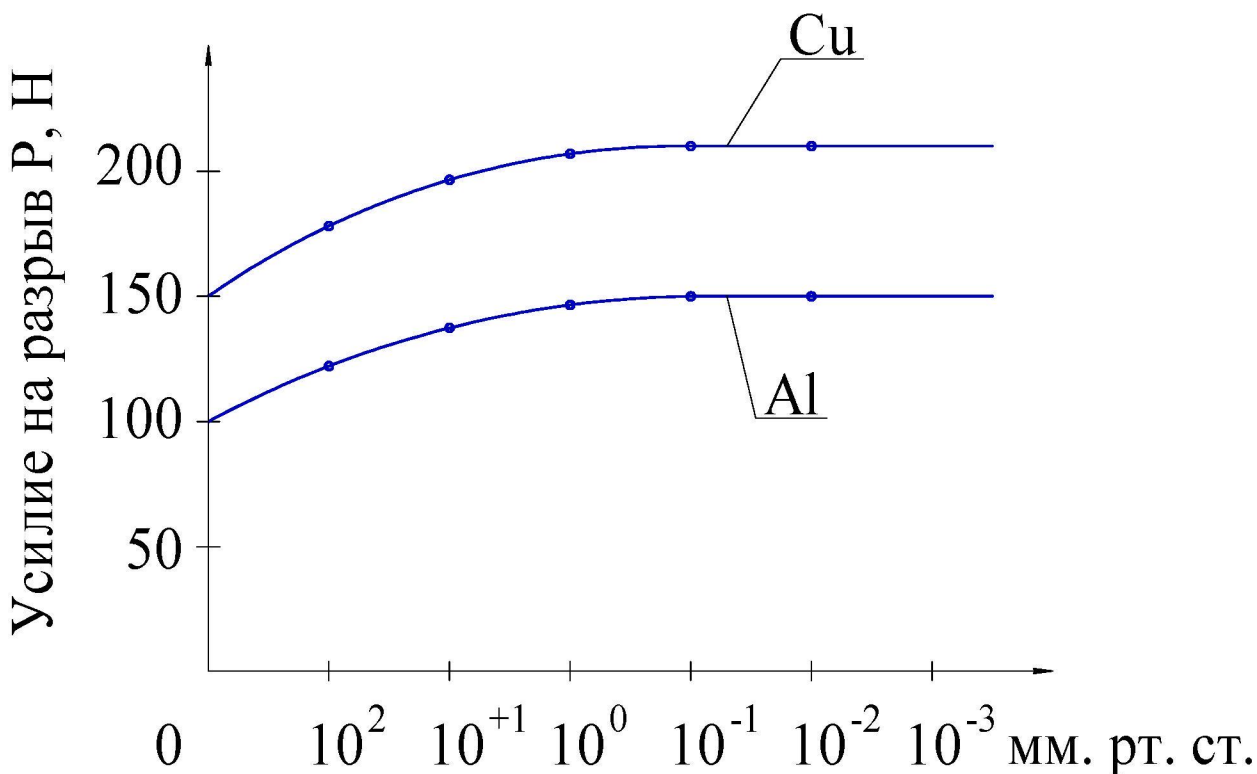


Рис. 14. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от степени разрежения в технологической камере.

Испытания на термостойкость осуществлялись в специальной камере, где имитировались условия пожара. Остро сфокусированное пламя газовых горелок направлялось под разными углами на сварную конструкцию до температуры  $300$ - $400^0$  С. Термическая нагрузка осуществлялась многократно.

В таблице 3 отражены результаты испытаний образцов прошедших "аварийную" ситуацию. Тонкостенные трубчатые детали из алюминия получены при различных рабочих напряжениях накопителя емкостью 24 мкФ. Использовался 12-ти витковый витой индуктор.

При использовании матрицы с продольными формующими канавками, (формообразование осуществляется вне зоны соединения), зависимость усилия на разрыв от энергии импульса аналогична тем, которые получены при МИС с предварительной статической формовкой. Необходимо лишь увеличивать энергию разряда для реализации большей степени деформации рис. 15.

Таблица 3

Результаты испытаний на прочность и визуальный контроль

№	Рабочее напряжение U, кВ	Результаты визуального осмотра	Усилие на разрыв P, Н
1	1,5	Расслоение. Неполная деформация.	50
2	1,8	Дискретный непровар. Неполная деформация.	61
3	2,0	Дискретный непровар. Заготовка полностью сформована.	145
4	2,5	Карманов и расслоений нет. Полная деформация* - рациональные режимы.	148
5	2,8	Карманов и расслоений нет. Полная деформация.	149
6	3,0	Местные прожоги. Полная деформация.	145
7	3,5	Прожоги по образующей. Полная деформация.	125

При использовании матрицы с поперечной формующей канавкой, влияние

формовки существенно.

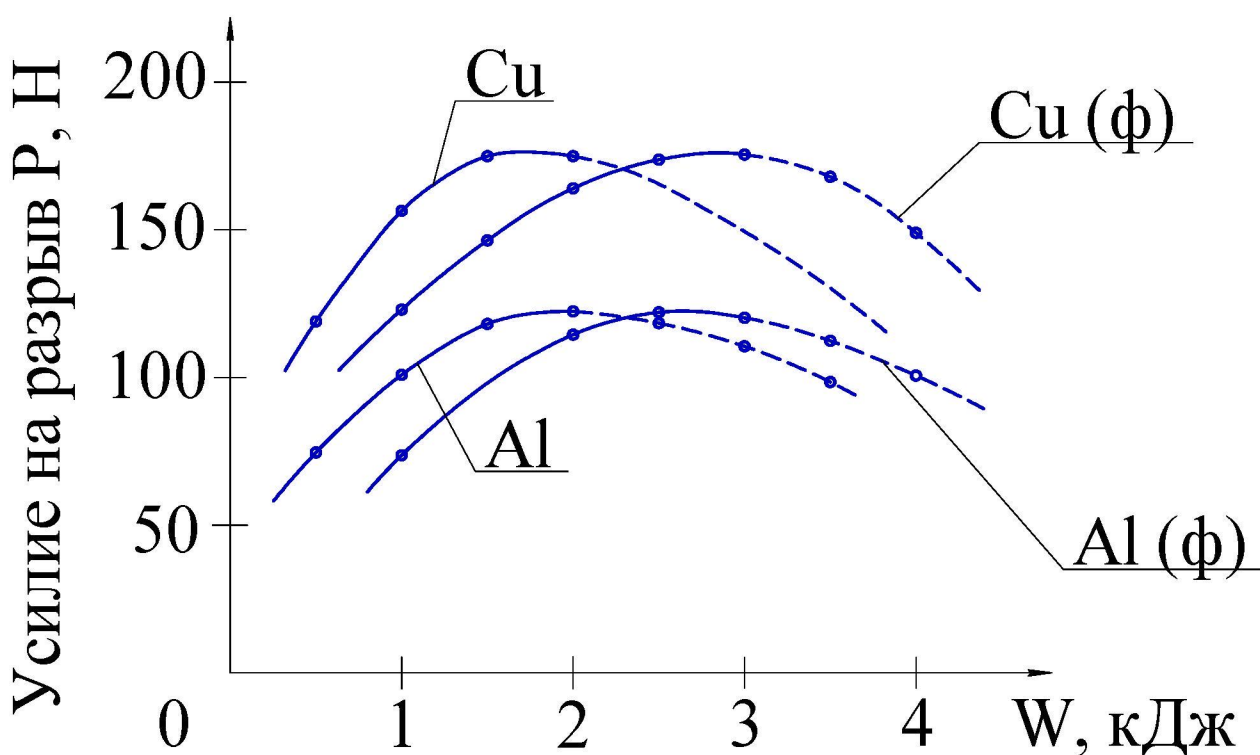


Рис. 15. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от энергии импульса.

Лишь при очень малых деформациях ( $r < 1\text{ мм}$ ), сварка происходит практически по всей поверхности сопряжения. По мере увеличения глубины формообразующей канавки, наблюдаются расслоения – непровары, а по достижению величины  $r > 3\text{ мм}$  – сварка в данной зоне не образуется рис. 16.

Это объясняется тем, что образовавшееся на ранней стадии процесса соединение разрушается усилиями, возникающими в процессе деформации.

Проверка сваренных тонкостенных трубчатых деталей на герметичность осуществлялась на гелиевом течеискателе ПТИ-10 с использованием специальной оснастки. Вакуумная плотность обеспечивается в зоне интенсивной локальной деформации вдоль кромки соединения по образующей трубчатой детали, где и создается непрерывный шов.

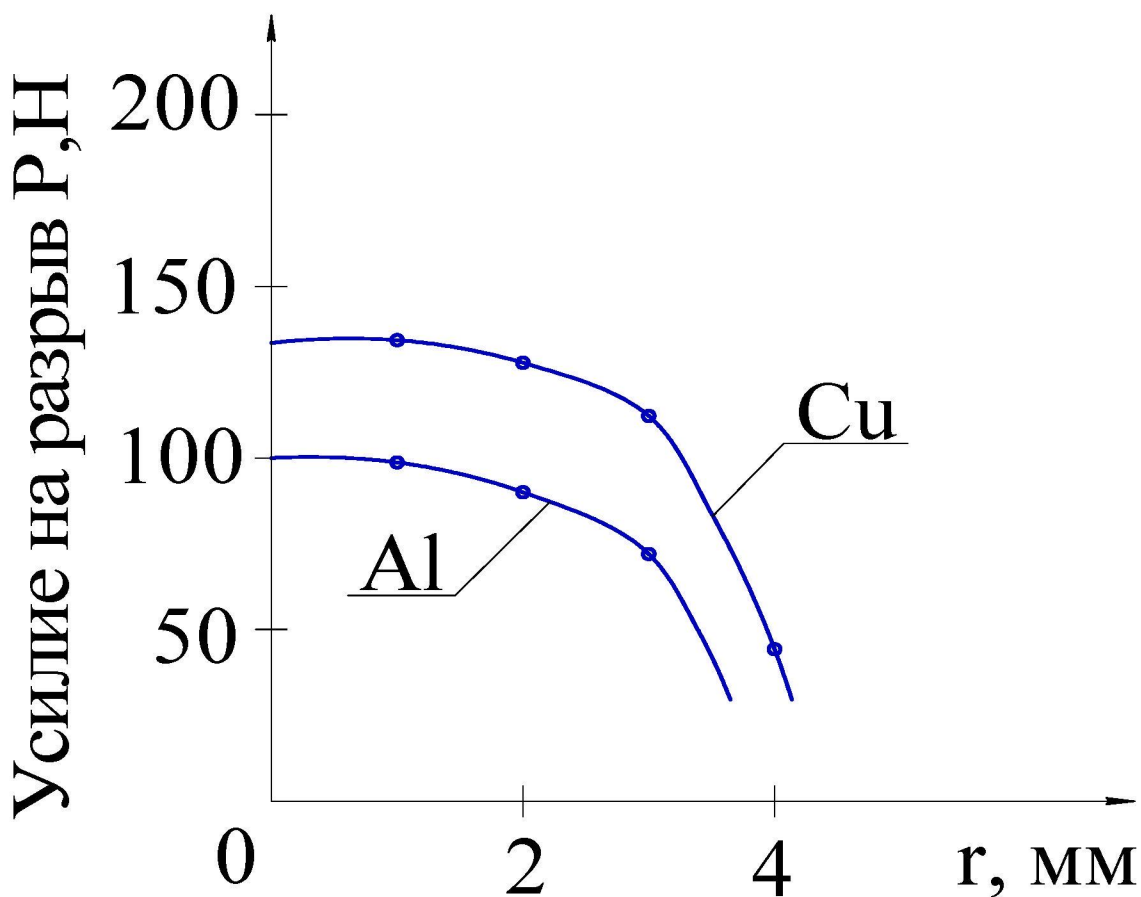


Рис. 16. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от радиуса канавки матрицы.

Зависимость степени натекания медной и алюминиевой тонкостенной трубчатой детали от напряжения на накопителе приведены на рис. 17.

Ёмкость накопителя в ходе экспериментов составляла 150 мкФ, число витков  $N = 5$ .

Ёмкость  $C$  накопителя магнитно-импульсной установки характеризует энергетические возможности оборудования и в совокупности с индуктивностью разрядного контура определяет также собственную и рабочую частоту импульса тока. В экспериментальной установке использовались импульсные конденсаторы серии ИК ёмкостью 3, 5, 12, 30, 150 мкФ.

Зависимость прочности соединения алюминия и меди (толщиной  $t = 0,5$ ) от величины ёмкости энерго модуля приведена на рис. 18 ( $U = 1,5$  кВ,  $n = 5$ ).

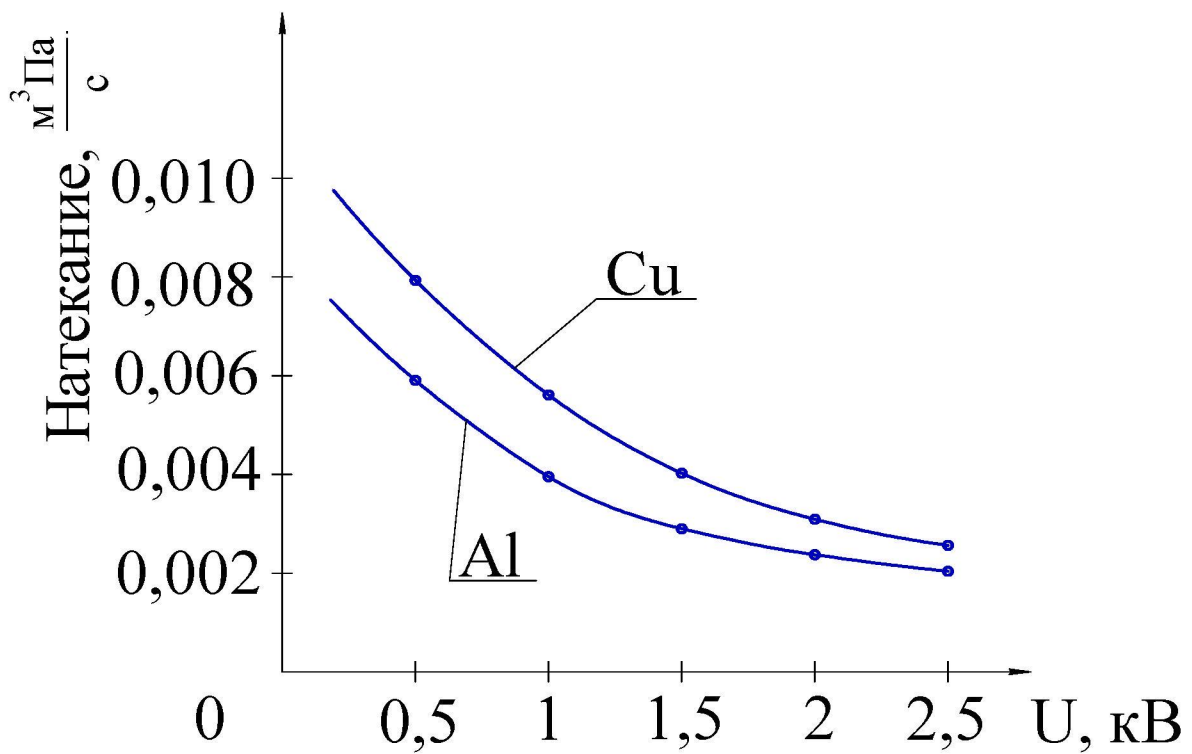


Рис. 17. Зависимость герметичности (натекания) соединения алюминия и меди от рабочего напряжения.

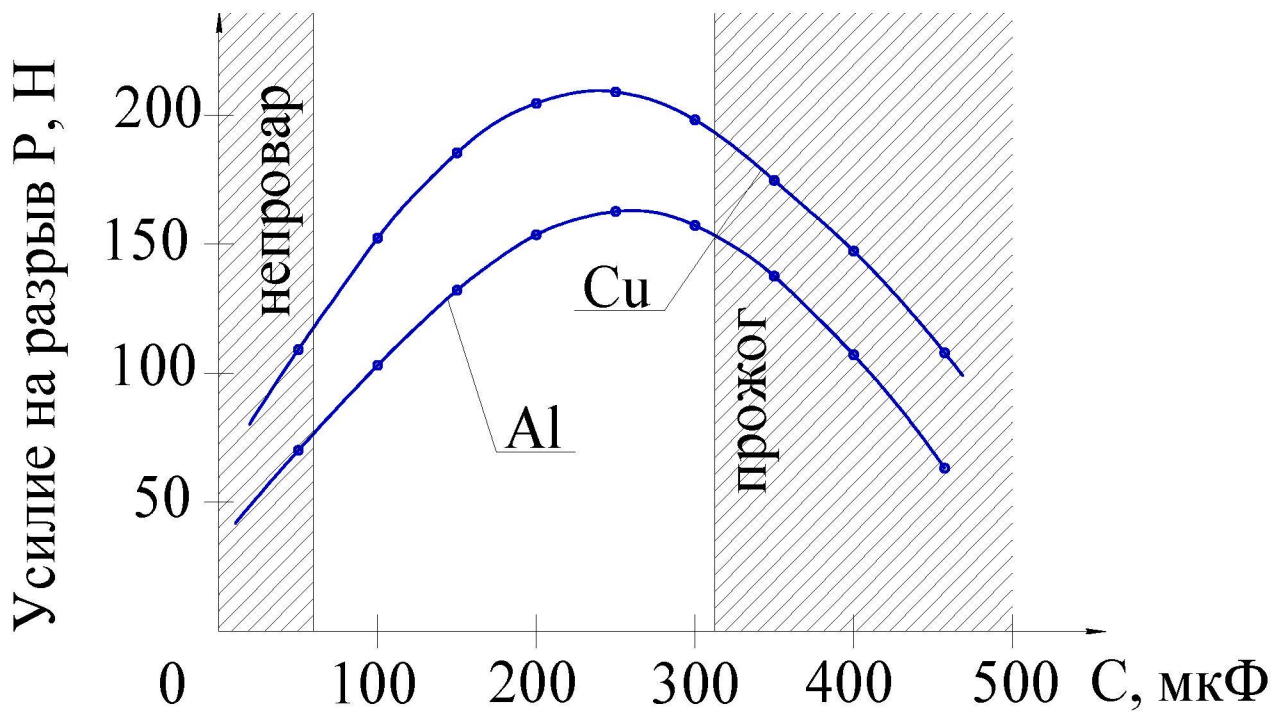


Рис. 18. Зависимость усилия на разрыв алюминия и меди от ёмкости накопителя



Конструкция рабочего инструмента-индуктора и число витков токопроводной спирали влияют на индуктивность разрядного контура, и, в конечном счёте, на частотные и энергетические параметры магнитно-импульсной обработки. Количество витков индуктора менялось от 1-го до 15-ти. Зависимость прочности сварного соединения от числа витков инструмента приведена на рисунке 19. Ёмкость накопителя  $C = 24$  мкФ, напряжение заряда 2.5 кВ.

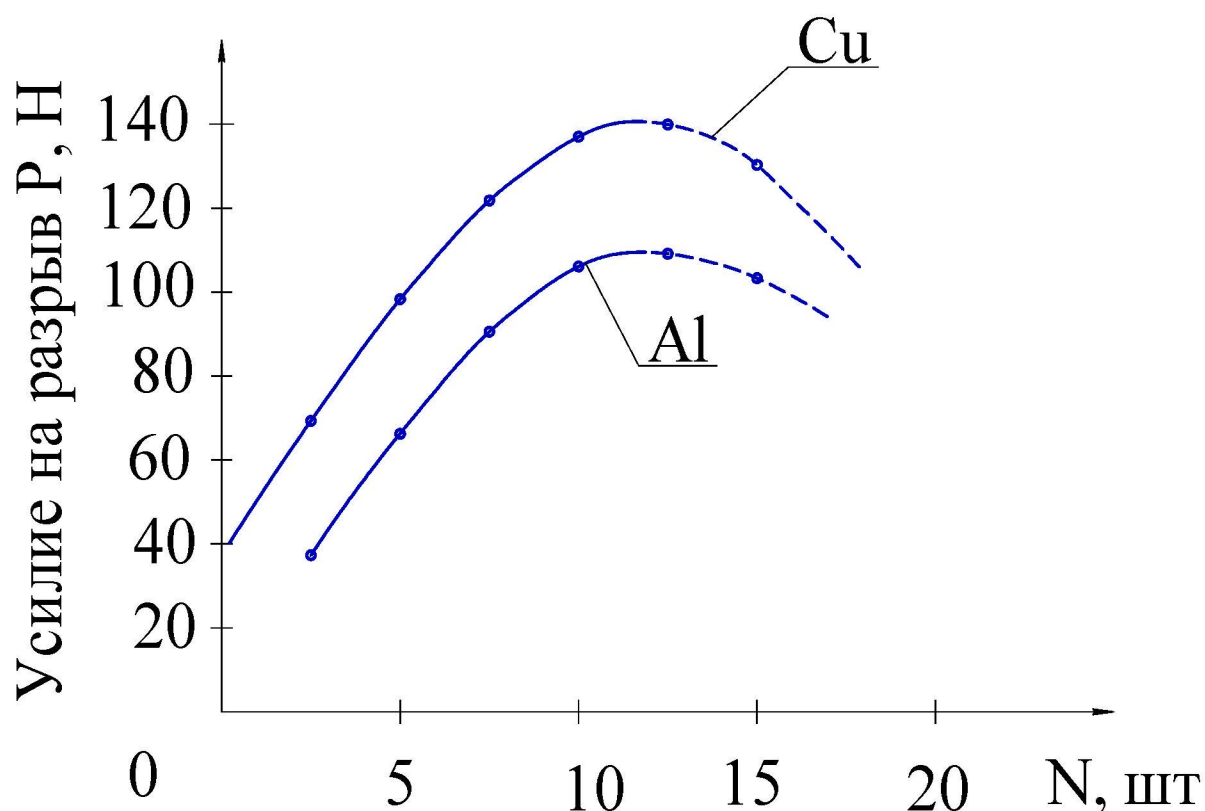


Рис. 19. Зависимость усилия на разрыв  $P$  алюминия и меди от числа витков индуктора  $N$ .

Ёмкость накопителя, рабочее напряжение и число витков индуктора – величины определяющие частоту и амплитуду разряда тока являлись переменными параметрами при определении оптимальных режимов магнитно-импульсной сварки-формовки различных материалов. Экспериментальные режимы сварки и значения прочности соединения алюминиевого

экспериментального образца приведены в таблице 4.

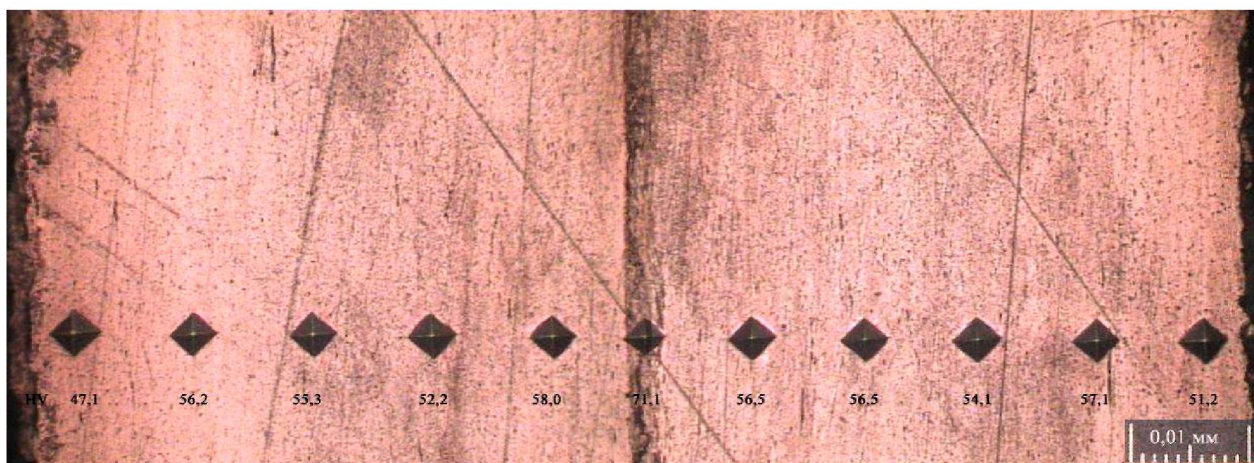
В результате проведенных экспериментальных исследований установлены области определения и эффективного варьирования основных параметров процесса МИСФ. Для различных экспериментальных образцов они имеют следующие значения: ёмкость накопителя  $C = 24-300$  мкФ; напряжение заряда  $U = 1-3$  кВ; число витков индуктора  $N = 5-12$ .

Таблица 4

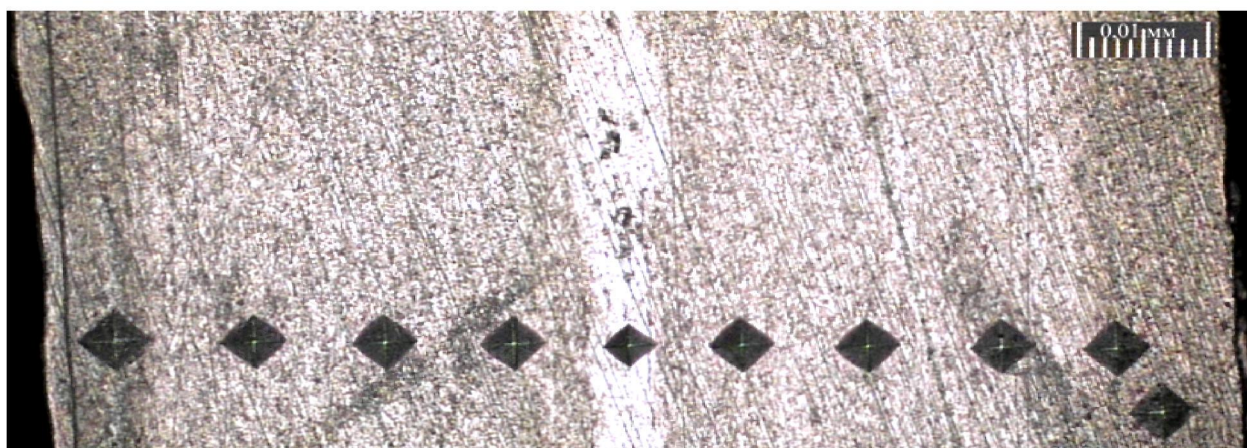
Экспериментальные режимы МИСФ и результаты испытаний  
алюминиевых тонкостенных трубчатых деталей

Ёмкость накопителя $C$ , мкФ	Напряжение заряда $U$ , кВ	Число витков $N$ , вт	Усилие разрыва $P$ , Н
50	1	1	20
150	1,5	4	50
150	2	4	70
300	1	4	80
300	1,5	4	100
300	1,5	8	110
300	1,5	12	120
300	2	12	150
450	1	8	100
450	1,5	8	90
450	1,5	12	90
600	1,5	8	80
300	2,5	8	110
300	2,5	12	140
300	1,5	12	110

Металлографические исследования зоны соединения не выявили образования общих зёрен. Микроструктурный анализ показал, что зона соединения характерна для сварки в твёрдой фазе известными импульсными методами. Имеется чёткая линия границы раздела – зона ”схватывания”, аналогично сварке взрывом и классической магнитно-импульсной сварке [27]. На рис. 20 изображена зона соединения меди и алюминия.



Cu + Cu × 100



Al + Al × 100

Рис. 20. Зона соединения меди и алюминия.

Исследование микроструктуры сварных соединений алюминиевых образцов и образцов из меди проводилось на микрошлифах залитых в эпоксидную смолу. Микроскоп «НЕОРНОТ 21», съёмка проводилась с помощью

цифровой камеры «Sanyo» (разрешение: 768×576) и промышленной системы анализа изображений «SIAMS 600». Микротвердость HV<sub>μ50</sub> замерялась на микротвердомере ПМТ-3М, с нагрузкой 50 грамм с помощью промышленной системы анализа изображений «SIAMS 600».

Травление алюминия проводилось в 5% водном растворе плавиковой кислоты (HF).

Результаты испытаний на прочность, герметичность, термостойкость, микроструктурный анализ соединений подтверждают гипотезу, возникающую из чисто физических соображений о сильной корреляции измеряемых величин. Следовательно, качество соединения можно эффективно оценивать по результатам определения наиболее выразительной величины, измеряемой наиболее просто - усилие на разрыв, которая и была принята за параметр оптимизации в дальнейших исследованиях процесса МИСФ [45].

#### **2.4. Экспериментальное оборудование и оснастка**

Экспериментальные исследования осуществлялись на специально разработанной экспериментальной лабораторной установке в вакууме [58]. Использовался накопительный блок генератора импульсных токов, которой был модернизирован и при переналадке позволял получать значения ёмкости батареи конденсаторов  $C$  от 3 до 600 мкФ, напряжение менялось от 1 до 15 кВ. Оборудование было снабжено специальным измерительным стендом (см. гл. 5), позволяющим фиксировать параметры разряда тока на рабочий инструмент-индуктор. Таким образом, определялись частотные и энергетические характеристики процесса.

При проектировании оборудования для совмещённого процесса магнитно-импульсной сварки-формовки необходимо обеспечить определенную комбинацию основных конструктивных элементов установки и режимов её работы, а с другой – наилучшим образом удовлетворить ряд требований, связанных непосредственно с технологией процесса [18].

С технологической точки зрения установка МИСФ должна обеспечить следующее [34]:

- загрузку, фиксацию и закрепление свариваемой конструкции с требуемой точностью;
- зарядку в автоматическом режиме генератора импульсов тока (ГИТ);
- подачу энергии накопительного блока ГИТ на рабочий инструмент (индуктор) определенной позиции;
- возможность варьирования параметрами процесса;
- безопасность эксплуатации высоковольтного оборудования.

Основными функциональными узлами установки являются: генератор импульсных токов (ГИТ), технологический блок (ТБ), включающий в себя индукторная система и оснастка (матрица) (см. таблицу 5)

Таблица 5

Основные функциональные узлы установки МИСФ	Методы выбора, расчёта и проектирования
Многоканальный ёмкостной генератор импульсов тока	Необходимы проектные изыскания
Индукторная система	Подлежит экспериментальным исследованиям
Многопостовой технологический блок	Необходимы проектные изыскания
Оснастка	Проектные изыскания
Зарядное устройство	Стандартный блок

Известные устройства магнитно-импульсной обработки [15, 81] могут быть использованы лишь для реализации некоторых постановочных экспериментов по осуществлению МИСФ. Специализированного

технологического оборудования до настоящего времени не создавалось.

Для проведения широкомасштабных исследований принципиально нового процесса получения тонкостенных трубчатых деталей была разработана и изготовлена экспериментальная лабораторная установка магнитно-импульсной сварки в вакууме [58].

Установка состоит из переналаживаемого генератора импульсных токов, технологического блока и измерительного стенда, предназначенного для фиксации параметров разряда ёмкостного накопителя энергии на индуктивную нагрузку. На рис. 21 изображена блок схема экспериментальной установки, а в таблице 6 приведены основные технические характеристики. Общий вид экспериментальной установки ЭУМИСФВ приведён на рис. 22.



Рис. 22. Общий вид экспериментальной установки

## Основные технические характеристики экспериментальной установки

№	Параметры оборудования	Единицы измерения	Значения
1	Запасенная энергия накопителя, $W$	Дж	100-10000
2	Ёмкость батареи конденсаторов, $C$	мкФ	3-600
3	Рабочее напряжение, $U_p$	кВ	1÷15
4	Диапазон измеряемых частот, $f_0$	кГц	20÷200
5	Давление в рабочей камере, $B$	Па	133,33÷13,33
6	Напряжение сети, $U_c$	В	380
7	Измеряемые токи, $I$	кА	1÷500
8	Потребляемая мощность, $P$	кВт	5

На основании каркаса генератора расположены конденсаторы емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) и высоковольтный источник тока (дроссель, конденсаторы, трансформатор). Над ЕНЭ расположен блок коммутации (разрядники с токоподводящими шинами и кабелями). На передней стенке генератора расположен блок управления. Рабочий инструмент-индуктор подключается к токоподводящим шинам. Высокочастотный генератор подает питание на рабочий инструмент-индуктор и осуществляется совмещённый процесс магнитно-импульсной сварки-формовки [58].

При разработке оборудования МИСФ важное значение приобретает необходимость в анализе особенностей протекания отдельных элементов рабочего цикла в их взаимосвязи, определяющей производительность установки.

Технологическая диаграмма процесса, иллюстрирующая длительность и согласованность между собой во времени различных переходов приведена на рис. 23.

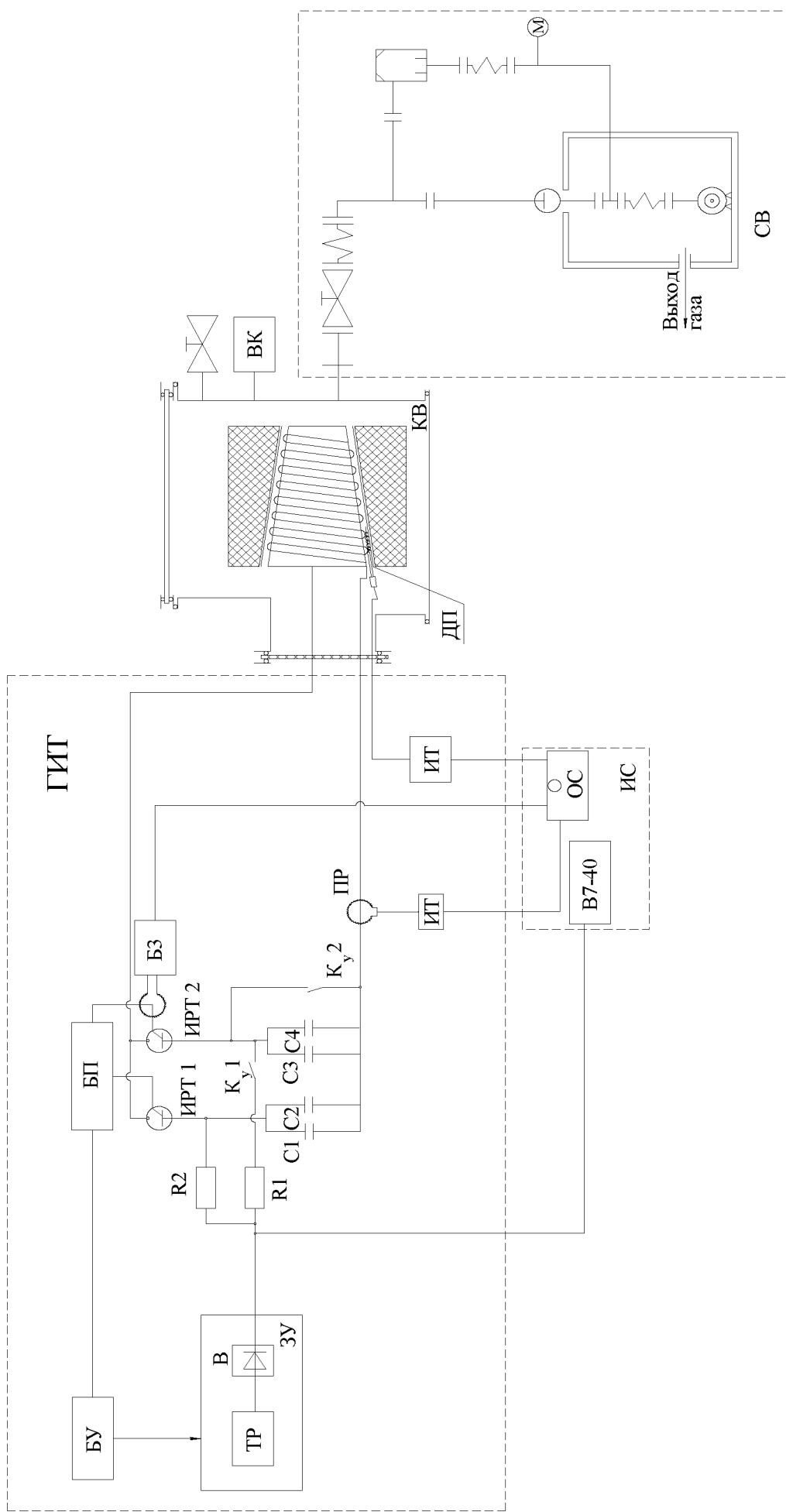


Рис. 21. Блок схема экспериментальной установки магнитно-импульсной сварки-формовки в вакууме (ЭУМИСФВ).  
 ГИТ-генератор импульсных токов; БУ-блок управления; ЗУ-зарядное устройство; БП-блок поджига; БЗ-блок запуска;  
 ДП-датчик поля; ПР-пояс Роговского; ИС-измерительный стенд; ОС-осциллограф С8-14; В7-40-вольтметр;  
 СВ-система вакуумная; КВ-камера вакуумная с инструментом и оснасткой; ВК-вакуумметр;  
 К<sub>у</sub>1, К<sub>у</sub>2- высоковольтный коммутатор; С1-С2, С3-С4-импульсные конденсаторы (ИК6-150, ИК25-12);  
 ИРТ1, ИРТ2-игнитронные разрядники ИРТ-6; R1, R2-зарядные сопротивления.



Наиболее принципиальным моментом технологии МИСФ является магнитно-импульсное воздействие (МИВ). Именно время МИВ определяет технологический потенциал оборудования. Расчётные оценки и экспериментальные данные [45] показывают, что время эффективного воздействия  $t_{\text{мио}}$  составляет 20 – 100 мкс.



Рис. 23. Технологическая диаграмма процесса.

Все остальные переходы в работе импульсного оборудования

вспомогательные. Магнитно-импульсному воздействию предшествует зарядка ёмкостного накопителя энергии, время которого  $t_{зар}$  зависит от ёмкости накопительного блока С и выбранных элементов зарядного устройства [65].

Время загрузки заготовки на индуктор  $t_3$  и сборка матрицы  $t_{сб}$  полностью зависят от конструкции технологического устройства, инструмента, оснастки и определяется хронометражем.

Аналогично определяется время установления режима обработки  $t_{реж}$ , герметизации технологической камеры  $t_{гер}$ , вакуумирование (откачка)  $t_{отк}$ , разгерметизация камеры  $t_{разг}$ , и время разборки и выгрузки готового изделия  $t_{выгр}$ . При обработке различных тонкостенных трубчатых деталей (переналаживаемое мелкосерийное производство) к вспомогательным операциям добавляется смена рабочего инструмента и оснастки  $t_{и-о}$ .

Таким образом, длительность рабочего цикла магнитно-импульсной сварки-формовки – такт однопозиционной установки  $T_y$  может быть выражен в виде:

$$T_{ц} = t_3 + t_{сб} + t_{гер} + t_{отк} + t_{реж} + t_{раз} + t_{мио} + t_{зар} + t_{выгр} + t_{и-о}. \quad (17)$$

Цикловая производительность установки МИСФ выразится через время холостых  $t_{хол}$  и рабочих ходов  $t_{раб}$  как:

$$G_{ц} = \frac{1}{T_{ц}} = \frac{1}{t_3 + t_{сб} + t_{гер} + t_{отк} + t_{реж} + t_{зар} + t_{мио} + t_{разг} + t_{выгр} + t_{и-о}} = \frac{1}{(t_{хол} + t_{раб})}. \quad (18)$$

Для снижения длительности рабочего такта устройства МИСФ необходимо стремиться к сокращению длительности отдельных переходов. Наиболее существенный резерв времени заложен во вспомогательных элементах рабочего цикла  $t_3 + t_{сб} + t_{гер} + t_{отк} + t_{разг} + t_{выгр} + t_{и-о}$ , длительность которых больше по сравнению с рабочими элементами цикла  $t_{зар}$ ,  $t_{мио}$ .

Анализ технологической диаграммы (рис. 23) и выражения (18) позволяет найти пути повышения производительности установок МИСФ. Прежде всего, это выбор элементов высоковольтного зарядного устройства, совершенствование конструкции технологического блока, инструмента и оснастки, а также использование принципа совмещения переходов в результате

создания многоместных агрегатов.

Одним из основных элементов установки, конструкция которого влияет на параметры процесса, является индукторный узел. Индуктор - основной инструмент МИСФ должен обеспечивать необходимое электродинамическое воздействие на заготовку и обладать при этом экономически целесообразной стойкостью [52]. Первое требование обеспечивается подбором оптимальных параметров спирали применительно к заданным условиям сварки и характеристикам магнитно-импульсной установки. Удовлетворение второму требованию является наиболее трудной задачей, так как индуктора во время работы находятся в сложных условиях интенсивного механического и теплового нагружения [65].

Условия формирования соединения большинства металлов, используемых в трубчатых деталях, требует обеспечения сравнительно длительного магнитного давления (длительности первой полуволны 10-30 мкс). Это соответствует величине рабочей частоты в контуре установки 30-50 кГц.

Учитывая, что длина зоны обработки в трубчатых деталях довольно значительная (10-100 мм) и, как правило, больше диаметра основания с учетом требований по частоте разряда тока, целесообразно применения для устройств МИСФ в основном многовитковых индукторов [57].

Индуктор - обычно состоит из токопроводящей спирали, токоподводов, изоляции и элементов механического усиления. Индукторы, используемые в установках магнитно-импульсной сварки, в зависимости от назначения, можно разделить на 3 вида: для обжима, раздачи трубных и деформации плоских заготовок [3].

Главный элемент индуктора - токопроводящая одно - или многовитковая спираль - служит для образования импульсного магнитного поля с заданными параметрами. Форма рабочей поверхности с эквидистантным зазором повторяет форму исходной заготовки [52].

Одновитковые индукторы значительно прочнее и проще в изготовлении по сравнению с многовитковыми. Другой особенностью одновитковых

индукторов является возможность получения более высокой частоты тока разряда. При повышенной частоте разряда одна и та же величина скин-слоя может быть достигнута в материалах с меньшей электропроводностью[4]. Снижению требований к электропроводности материала одновитковых индукторов способствует также уменьшение пути прохождения тока в индукторе. Таким образом, одновитковые индукторы могут быть изготовлены из материалов с повышенным удельным электрическим сопротивлением и высокой механической прочностью, в частности из стали, молибдена, тантала [11]. Конструкция одновиткового индуктора используемого в исследованиях процесса МИСФ приведена на рис. 24.

Недостатком одновитковых индукторов является зависимость создаваемого ими давления от индуктивности установки. Вследствие малой индуктивности одновитковых индукторов необходимо использовать более сложную высокочастотную магнитно-импульсную установку с малой собственной индуктивностью  $L_y$  порядка 10-15 нГн.

Недостатком одновитковых индукторов также является наличие радиального паза, разделенного изоляцией. Радиальный паз искажает поле в его окрестности, что влияет на качество сварного соединения. Поэтому ширина паза должна быть минимальной.

Использование многовитковых индукторов позволяет получать различные давления при одной и той же величине запасенной энергии и собственной индуктивности установки в результате изменения числа витков индуктора. Спирали многовитковых индукторов могут быть навиты из шин или проволоки, изготовлены из цельной заготовки механической обработкой или набраны из пластинчатых секций [3].

Стойкость индуктора в значительной степени зависит от качества применяемой изоляции, её электрической и механической прочности. Используются фторопластовая и лавсановая плёнка, керамика и другие изоляционные материалы. Наилучшие эксплуатационные характеристики показала композиция – стеклоткань, пропитанная эпоксидным компаундом. Эта

композиция и использовалась в индукторах МИСФ.

Для осуществления магнитно-импульсной сварки-формовки были разработаны и исследованы следующие виды индукторов:

1. Одновитковые точёные индуктора из стали (рис. 24);
2. Витые цилиндрические индуктора из медной шины (рис. 25);
3. Пластинчатые секционированные конструкции (рис. 26);



Рис. 24. Одновитковый индуктор.

Разработанные применительно к магнитно-импульсной сварке индуктора оценивались по следующим критериям: приведенная индуктивность  $L_{и-з}$  и активное сопротивление  $R_{и-з}$  системы индуктор - заготовка, среднестатистическая наработка на отказ  $N_{и-з}$ , стоимость инструмента  $C_{и-з}$  и максимальная напряжённость магнитного поля  $H$  в рабочей зоне индуктора. Характеристики индукторов определялись экспериментально осциллографированием осевой компоненты напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора с использованием экспериментального измерительного стенда (раздел 5.2).

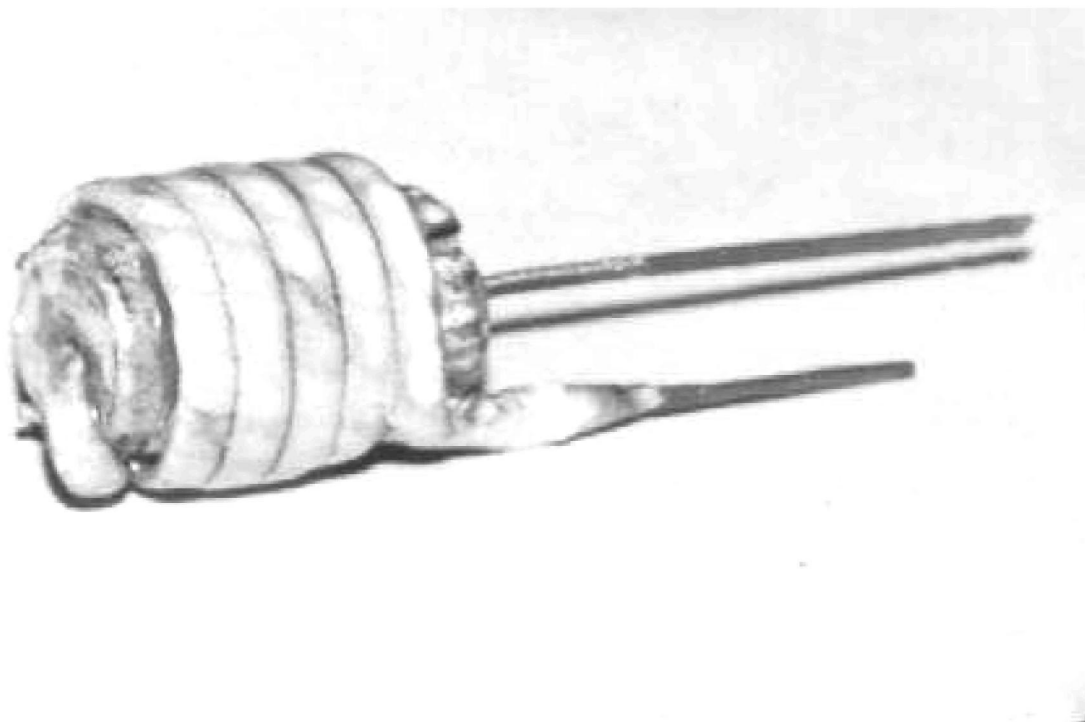


Рис. 25. Пятивитковый цилиндрический индуктор из медной шины.

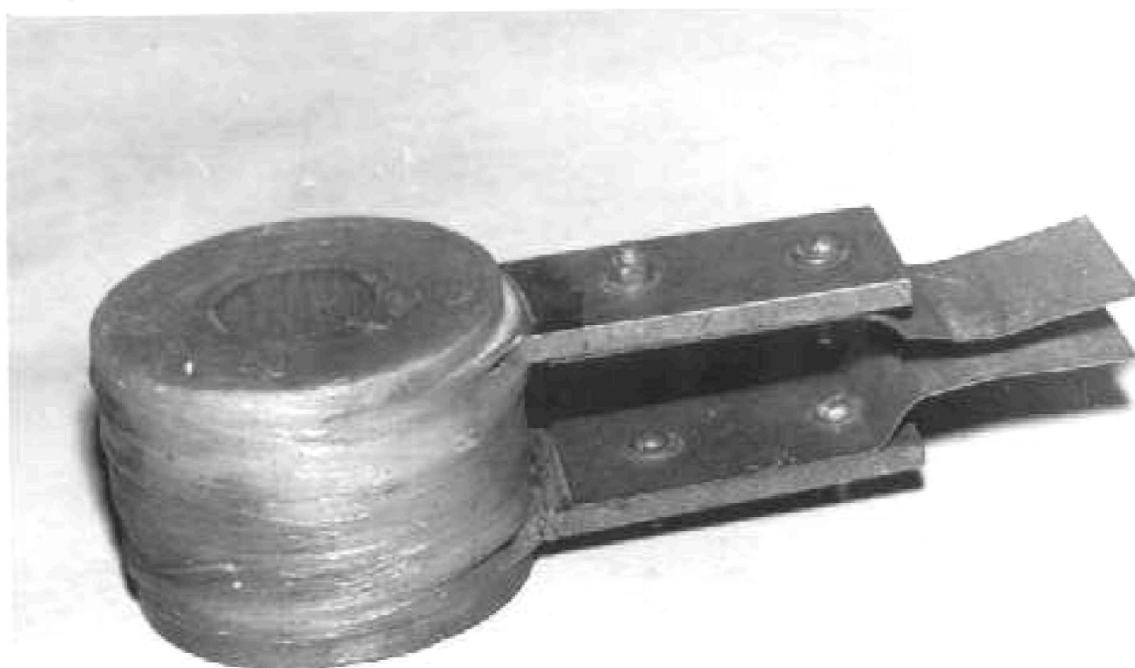


Рис. 26. Пластинчатый индуктор «на обжим» с осевым бандажом и изоляцией из текстолита.

Осциллограммы напряженности магнитного поля  $H(t)$  и значения характеристик индукторов приведены на рисунке 27 и в таблице 7. Все индуктора имели диаметр рабочей зоны 37 мм, длину 25 мм, энергия  $W = 1.5$  кДж.

Различие характеристик разряда связано с различным числом витков индуктора, конструкцией токоподводов и вносимыми потерями электропроводных усиливающих элементов (бандажей), теоретически учесть которые практически не возможно.

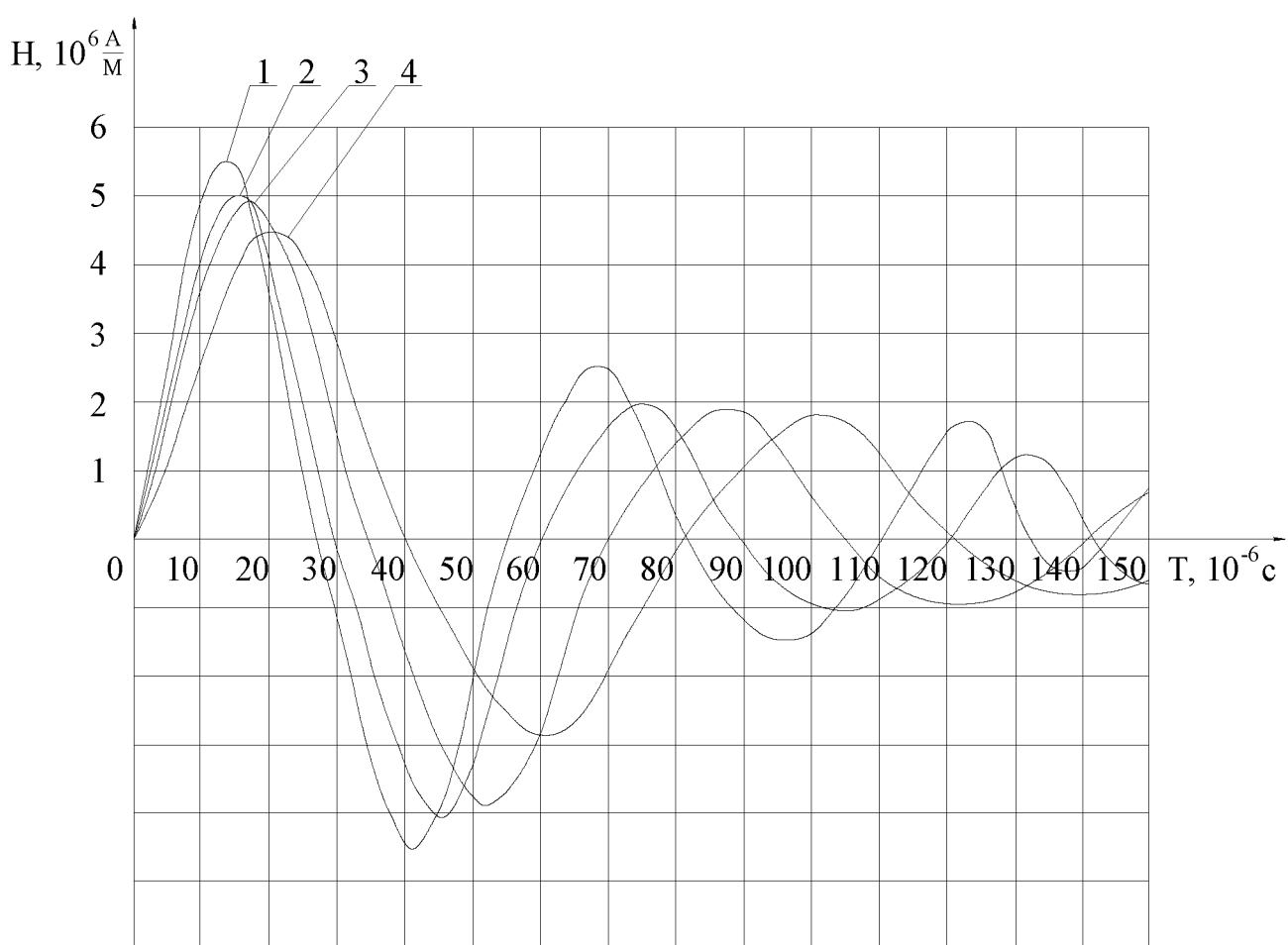


Рис. 27. Осциллограммы напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора.

1 – четырех витковый индуктор, 2 – пяти витковый индуктор, 3 – шести витковый индуктор, 4 – шести витковый индуктор в вакуумной камере.

Наилучшие показатели оказались для сварки экспериментальных образцов у витого индуктора. Он обладает необходимой индуктивностью, обеспечивающую нужную длительность первой полуволны магнитного давления при относительно большом значении амплитуды напряженности магнитного поля  $H(t)$ . Не смотря на сравнительно низкую стойкость, данный индуктор технологичен и прост в изготовлении, имеет наименьшую стоимость и рекомендован для использования в установках МИСФ.

Таблица 7

Значение характеристик различных индукторов

Тип индуктора	Индуктивность $L_{и-3}$ , нГн	Сопротивление $R_{и-3}$ , $10^{-3}$ Ом	Долговечность $N_{и}$ , шт.	Стоимость $C_{и}$ , руб.	Напряженность магнитного поля $H$ , $10^6$ А/м
Одновитковый индуктор	20	1,2	1800	150	2,4
Витой индуктор (5-ти витковый)	220	2,2	1000	200	4,9
Витой двухзаходный индуктор (8-ми витковый)	240	5,8	1000	200	6
Пластинчатый индуктор	166	3,3	1500	500	4,6



## 2.5. Разработка технологии МИСФ корпусов заделки кабеля

Существенной частью конструкций, определяющей надежность и вес космических аппаратов, является бортовая кабельная сеть (БКС). Большинство простых и сложных проблем, требующих изменения электрических схем, успешно и оперативно решаются путем доработки БКС [35].

Развитие современной электронной техники, применяемой в космических аппаратах, привело к резкому уменьшению токов потребления. Токи стали соизмеримы с электрическими помехами, при этом резко возросли требования разработчиков систем к точности передачи сигналов и минимуму потерь и искажений. Для защиты от высокочастотных излучений требуется экранирование всех элементов кабелей от помех с помощью экранирующей плетёнки и специальных облегчённых корпусов.

Разработчикам ГКНПЦ им. М. В. Хруничева удалось пересмотреть конструкцию БКС и создать новые, значительно более легкие составные части кабелей. В настоящее время сделаны практические шаги по внедрению новых технологий для узлов заделки кабелей. В частности, впервые спроектирован новый узел заделки кабеля с облегченной цельнометаллической оболочковой экранировкой. Облегченный экранирующий корпус заделки кабеля в штепсельный разъём является типичной трубчатой деталью сложной формы.

Для изготовления облегченной конструкции трубчатых деталей была предложена и освоена пионерская технология изготовления штампосварных корпусов из алюминиевой фольги толщиной 0,15-0,2 мм методом магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) [62].

Эскиз экранирующего корпуса-соединителя приведён на рис. 28.

Схема последовательности операций при изготовлении корпуса электросоединителя приведены на рис. 29.

Технология изготовления корпуса соединителя сводится к последовательному выполнению следующих операций [19]:

1. Резка заготовок размерами 52×26 мм по шаблону.

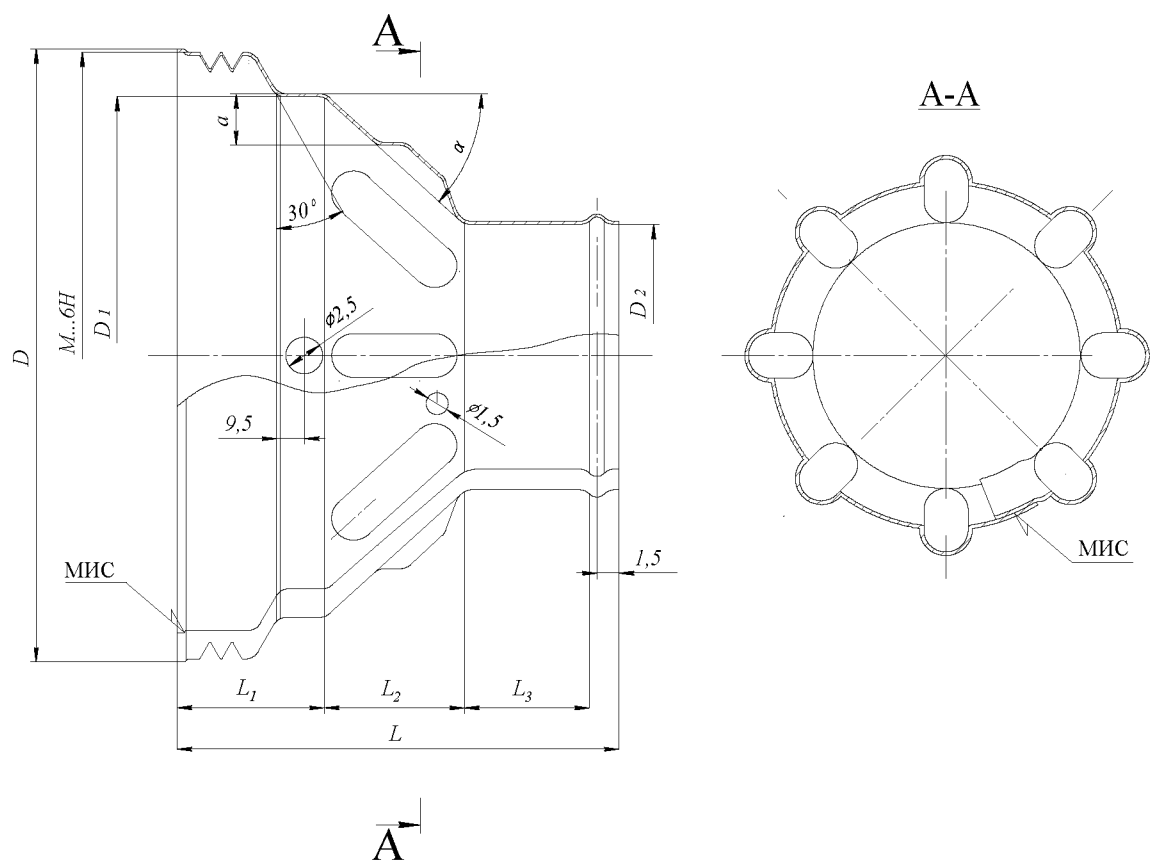


Рис. 28. Эскиз экранирующего корпуса-соединителя

2. Эласто-магнитно-импульсная штамповка (ЭМИШ) [3] фигурной заготовки и обработка кромок под сварку.
3. Сборка заготовки, индуктора и матрицы.
4. Магнитно-импульсная сварка-формовка (основной процесс).
5. Съем изделия и контроль качества.

Перед сваркой фольга может проходить специальное химическое оксидирование с образованием на поверхности электропроводных окислов алюминия, но этот процесс является необязательным.

Проведенный расчёт необходимой рабочей частоты обработки показал, что для осуществления МИСФ без «магнитной подушки» [3] необходима установка, с генератором импульсов тока, обеспечивающих рабочую частоту порядка 200-300 кГц. Создать промышленную установку с данными параметрами на базе стандартных комплектующих (конденсаторов) не

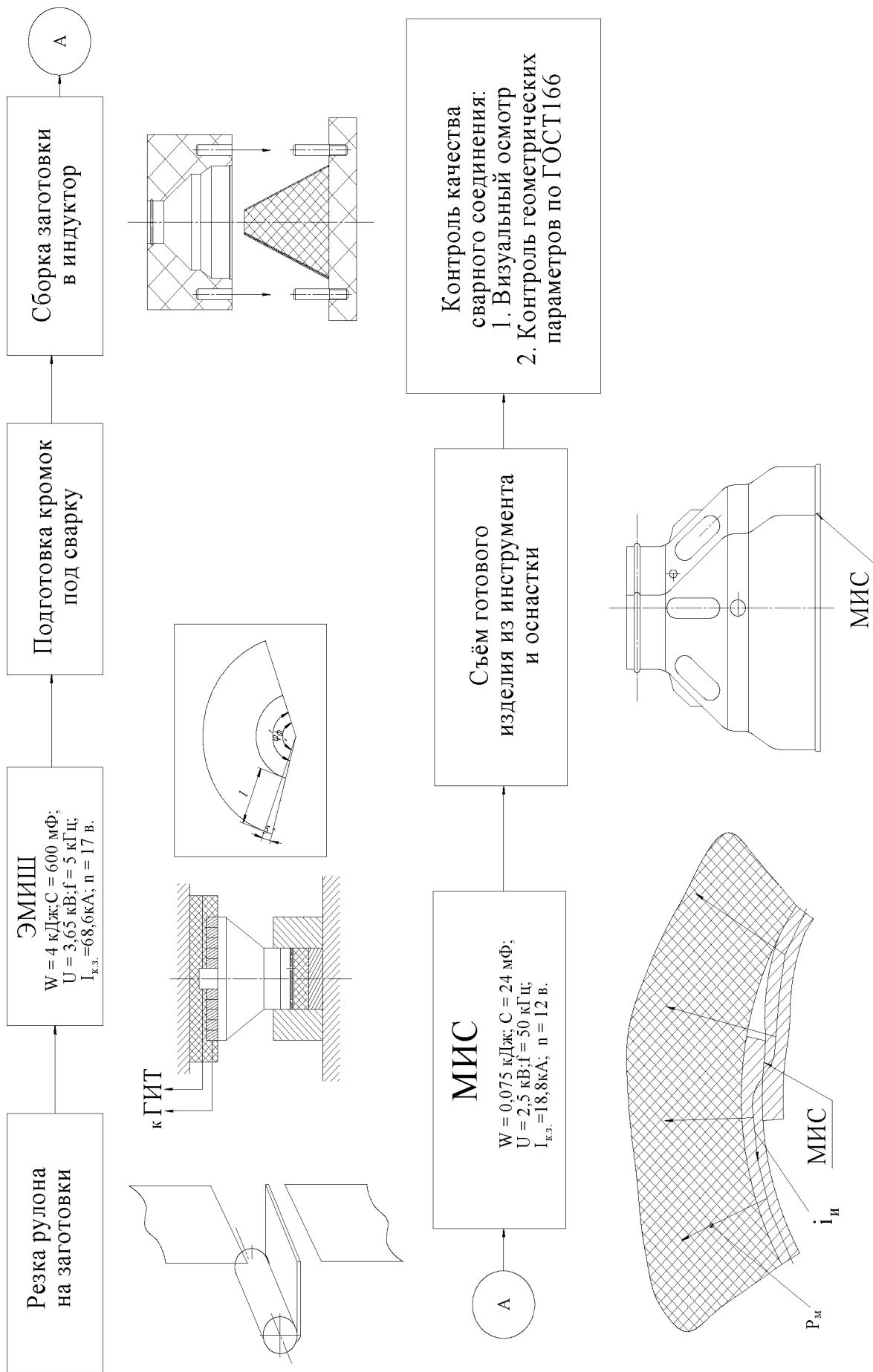
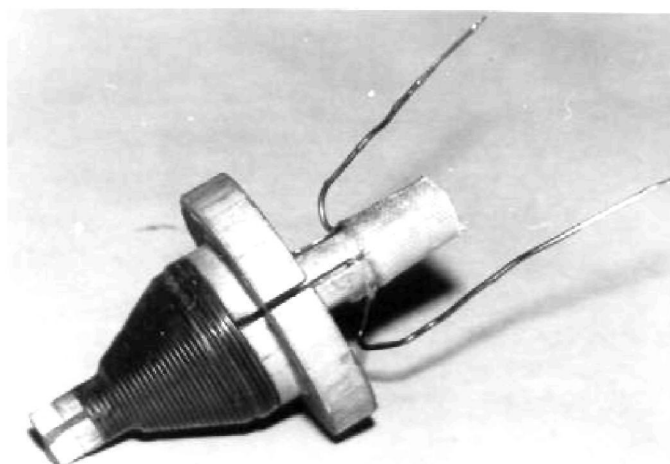


Рис. 29. Схема последовательности операций при изготовлении корпуса электросоединителя.

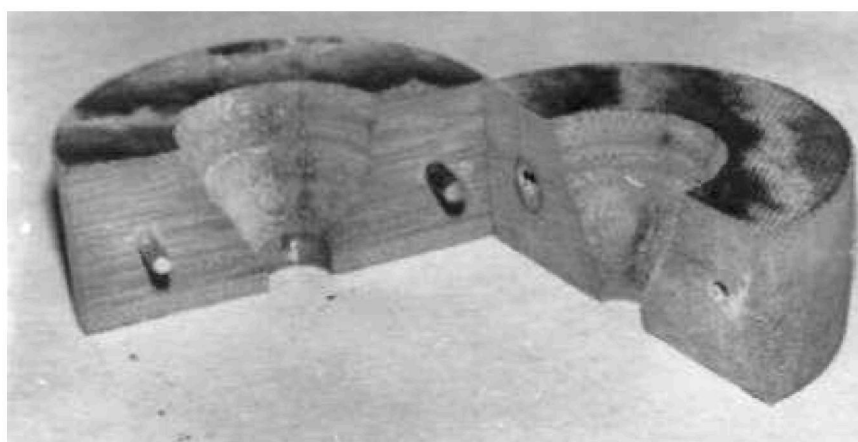
представляется возможным, поэтому сварка производилась с использованием диэлектрических матриц. Оснастка изготавливалась из стеклотекстолита. Прочность данного материала обеспечивала требуемую долговечность (более 1000 циклов) при сварочном (магнитном) давлении  $P_{св}$  порядка 10 кг/мм<sup>2</sup>.

Рабочая частота при сварке многовитковых индукторов не превышала значения 50 кГц, что приводило к проникновению части магнитного потока в зазор заготовка - матрица и в саму оснастку, однако никакого противодействия за счёт «магнитной подушки», заготовка не испытывала. Неизбежно терялась часть энергии заряда, уменьшался КПД процесса, но без ущерба качеству обработки.

Инструмент и оснастка МИС и кабеля в сборе приведены на рис. 30 и 31.



а) конический индуктор



б) разъемная матрица.

Рис. 30. Инструмент и оснастка МИСФ.

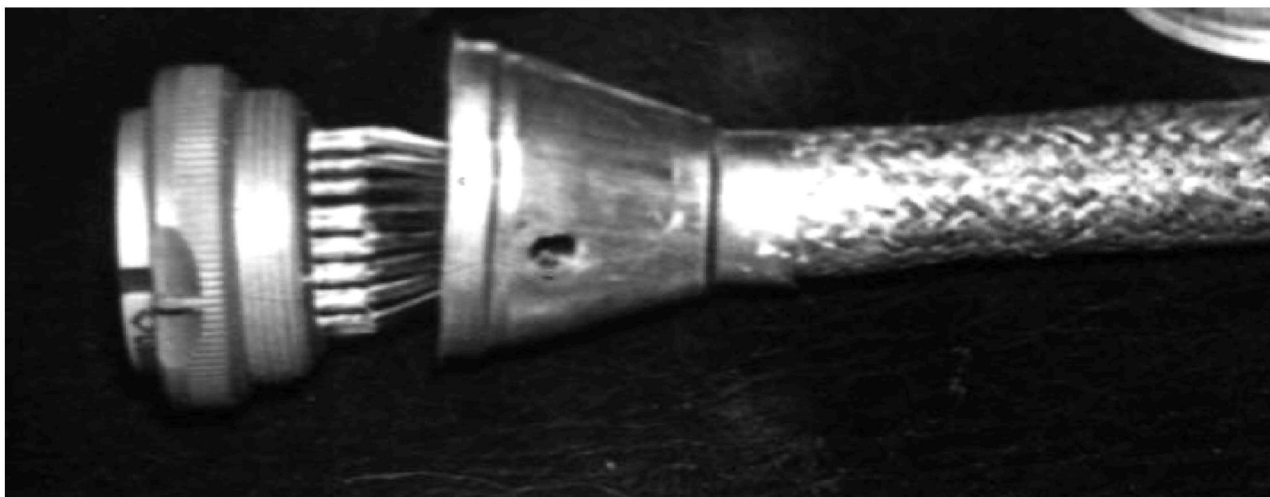


Рис. 31. Штепсельный разъём с облегченным экранирующим корпусом перед заливкой компаундом

Качество сварки трубчатых деталей оценивалось визуально, механическими испытаниями и термоциклированием. Кроме этого, облегченные корпуса в составе кабелей БКС прошли все виды динамических испытаний, включая испытания на долговечность. Кабельная продукция соответствует техническим требованиям на изделия. При этом масса узла заделки уменьшилась в 10 раз по сравнению со стандартной конструкцией.

Новая заделка кабеля в штепсельные разъемы обладает улучшенными свойствами пожаро - и взрывобезопасности, 100% - ой защитой от помех и статического электричества. Только наличие этих свойств позволяет иметь надежную кабельную сеть, что особенно необходимо для изделий с криогенными компонентами. Сравнительный анализ различных конструкций заделки корпуса в штепсельный разъём приведён на рис. 32.

Применение МИОМ при изготовлении трубчатых деталей намного проще, технологичнее и экономичнее всех без исключения ранее использовавшихся технологий для подобных конструкций. Технико-экономическая оценка проекта показала, что экономический эффект внедрения технологии на ракетном заводе ГКНПЦ достигнут за счёт снижения трудоемкости, уменьшения габаритов, и уменьшения веса конструкций.

Вложенные средства окупались за 3 месяца.

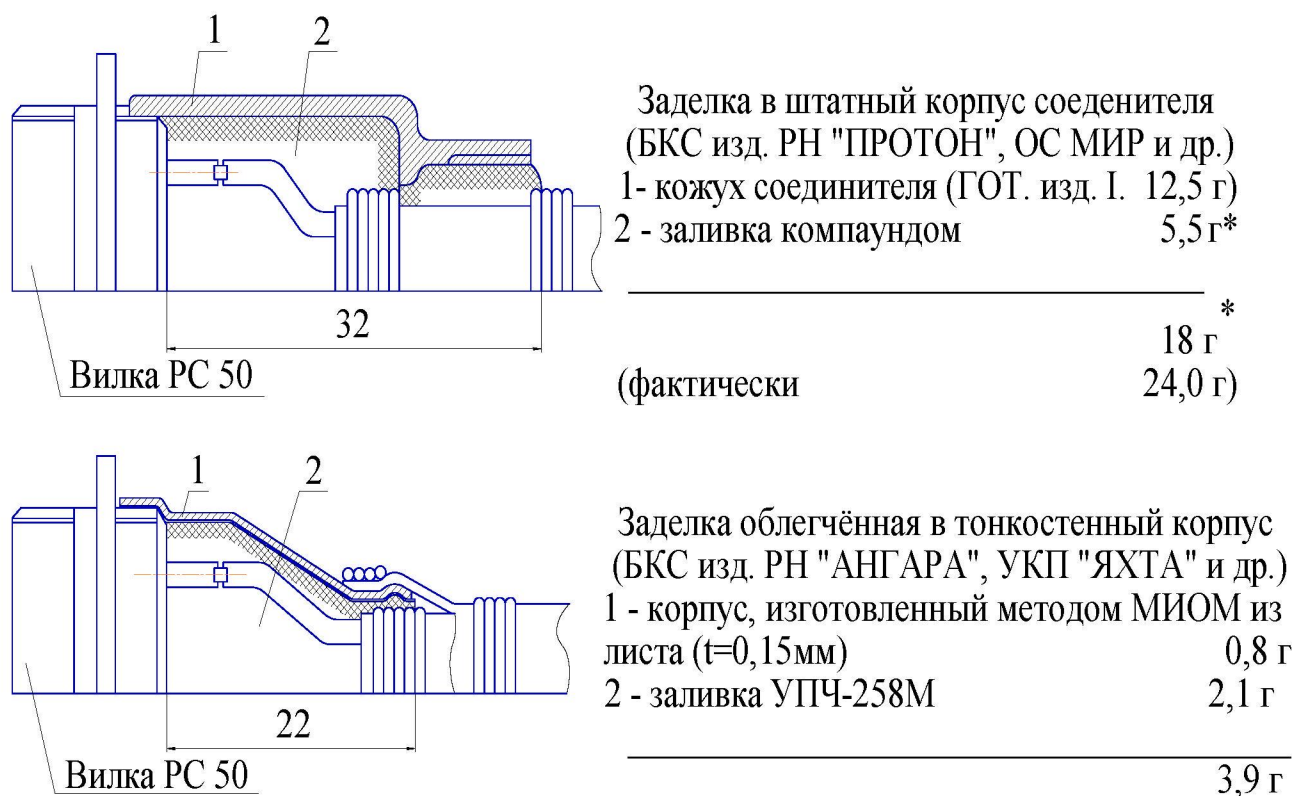


Рис. 32. Сравнительный анализ различных конструкций заделки корпуса в штепсельный разъём

Исследование и разработка процесса МИСФ осуществлялось совместно сотрудниками ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, ДГТУ и ООО «Электроимпульс» в рамках плана организационно-технологических мероприятий по созданию на РКЗ участка МИОМ.

Параметры режимов сварки различных конструкций алюминиевых корпусов изменяются в диапазонах: запасаемая энергия  $W = 100-500$  Дж; рабочая частота разряда тока  $f_p = 20-50$  кГц; рабочее напряжение  $U = 1-3$  кВ.

В таблице 8. приведены оптимальные режимы магнитно-импульсной сварки-формовки корпусов серии 15Е6-7201 выбранные и рассчитанные по методике изложенной в разделе 5.1.

Параметры техпроцесса магнитно-импульсной сварки-формовки  
корпусов соединителей

Обозначение корпуса	Ёмкость накопителя, С, мкФ	Рабочее напряжение, U, кВ	Энергия накопителя, W, Дж	Период разряда, T, $10^{-6}$ с
15E5-7201-11	24	2,2	58	70
15E5-7201-21	48	2,5	150	82
15E5-7201-24	48	2,6	162	82
15E5-7201-50	300	1,6	384	196

## Глава 3. Магнитно-импульсная сварка в вакууме

### 3.1. Особенности получения облицовочных эмиссионных покрытий

Во многих вновь разрабатываемых электровакуумных приборах рост напряжений и мощностей при работе в импульсном и непрерывном режиме приводит к повышению температуры рабочих поверхностей катодных узлов.

В результате возникают трудности в обеспечении стабильности параметров ЭВП в течение длительного срока службы. Именно поэтому в последнее время все большее применение находят металлосплавные эмиссионные материалы, которые сочетают в себе достаточно высокий уровень термо - и вторичной эмиссии, высокую электро - и теплопроводность, гладкую поверхность, что обеспечивает необходимый срок службы и надежность изделий. Высокая эмиссионная способность, стабильность ее во время всего срока службы в условиях бомбардировки мощным электронным потоком определяют перспективность и актуальность разработки экономически целесообразной технологии получения катодов для мощных ЭВП на основе таких катодных материалов как CuLi, AlBa, Pt, PtBa, PdBa, Jrla, Rela и др.

Металлосплавные вторично-эмиссионные катоды изготавливаются составными. Эмиттер в виде фольги или втулок из эмиссионного материала закрепляется на цилиндрической поверхности керна (рисунок 33) [23].

Катодный узел является самым теплонагруженным элементом прибора. Эмиттер в результате бомбардировки мощным электронным потоком (в импульсе  $1000 \text{ кВт/см}^2$ ) подвергается термоударам. Для нормальной работы прибора необходимо осуществить интенсивный теплоотвод с рабочей поверхности катода, обеспечив качественное соединение эмиттера с керном по всей поверхности сопряжения.

Невыполнение этого условия ведет к локальному перегреву, оплавлению рабочей поверхности, к межэлектродному пробоею, а в целом - к снижению надежности и долговечности прибора.



Существуют различные методы закрепления эмиттеров и получения контактов с кернами катодов электронных приборов (рисунок 34): механическое закрепление, пайка твёрдыми припоями, контактная сварка, диффузионная сварка в вакууме. Механическое закрепление эмиттера на керне не обеспечивает качественного теплового и электрического контакта по всей поверхности сопряжения и для приборов, работающих в особо жёстких режимах, данный метод не пригоден.

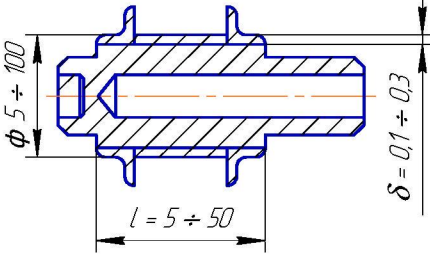
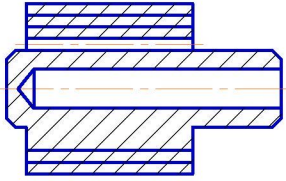
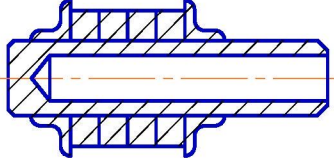
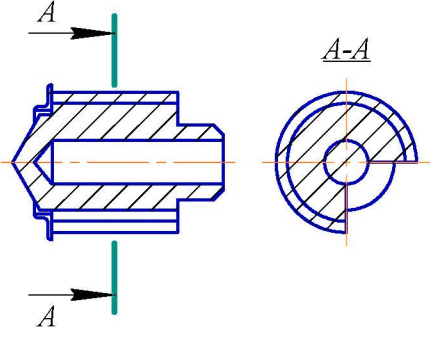
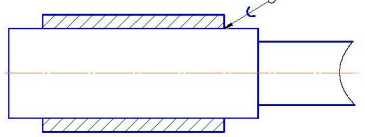
Конструктивные виды	Соединяемые материалы	Требования к соединениям
	Cu+CuLi; 12X18H10T+CuLi; 12X18H10T+AlBa; MoPt	Стойкость в условиях термоударов при разогреве мощным электронным потоком.
	Mo+Pt+PtBa; 12X18H10T+Pt+PtBa Mo+PtPdBa, Nb7+Pt+PtBa	Тепловой контакт по всей поверхности соединения.
	12X18H10T+(Cu-Li <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Mo+(Jr-JrLa) Mo+(Re-JrLa)	Рабочая температура 1000-1600 К. Удельная мощность электронного
	12X18H10T+ PtBa Mo+PtBa Mo+PdBa	потока $P_{CB} = 10 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$ ; $P_{\text{имп.}} = 1000 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$ .

Рис. 33. Вторично - эмиссионные катоды электровакуумных приборов

Контакт по всей соединяемой поверхности может быть получен пайкой припоями на основе серебра, золота, палладия. Однако при пайке трудно выдержать равномерную толщину припоя по всей поверхности сопряжения. Это не обеспечивает стабильности теплового и электрического контакта. Материалы кернов, в частности, наиболее часто используемый молибден, плохо смачиваются припоями, что часто приводит к непропаям, увеличивающим тепловое сопротивление и снижающим допустимую плотность тока. Кроме того, высокая диффузионная подвижность компонентов припоев, например, золота, приводит к их миграции в эмиттер в процессе длительной работы прибора, вследствие чего ухудшается коэффициент вторичной эмиссии. Наблюдается значительный разброс и нестабильность характеристик приборов, изготовленных пайкой.

Механическое закрепление и доработка опрессованных втулок	Расход материала		Трудоёмкость	Возможные виды брака
	основного	на оснастку		
	КИМ 0,3÷0,5		~ 1 н/час	Неоднородный контакт. Перегрев и деформация в процессе работы в ЭВП
Пайка твёрдым припоем 	Использование дефицитных материалов Au, Ag, Pd		0,2 н/час	Непропой. Миграция компонентов припоя в эмиттере.
Диффузионная сварка в вакууме	КИМ 0,98	2 кг Мо, 1 кг	12÷24 н/час	Непровар. Образование

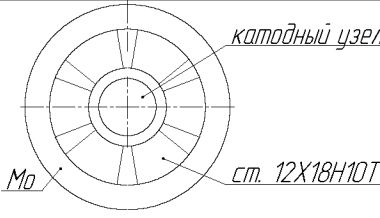
		стали 12X18H1 0T		интерметалли дных включений.
---	--	------------------------	--	------------------------------------

Рис. 34. Методы закрепления эмиттеров на кернах катодов

Применение диффузионной сварки (ДС) для соединения эмиттеров с кернами катодов обеспечивает получение качественных соединений и улучшает стабильность параметров и долговечность приборов. Для получения облицовочных эмиссионных покрытий на цилиндрических кернах используют приспособления, обеспечивающие получение давления сжатия за счет разности температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) используемых материалов (рисунок 35) [23].

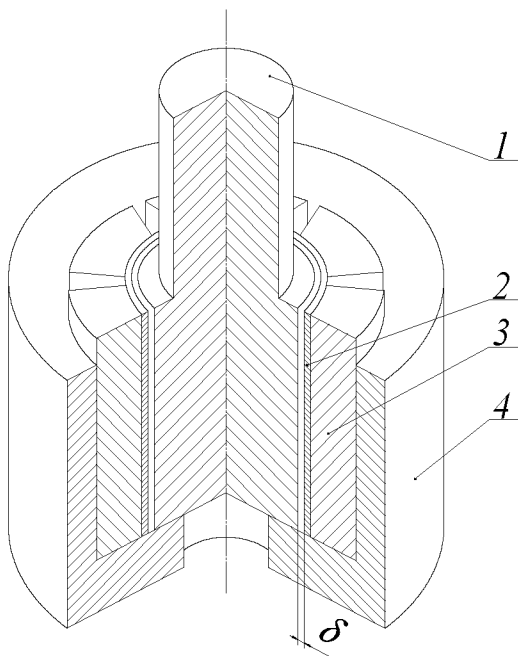


Рис. 35. Приспособление для сварки эмиттера с керном катода по цилиндрической поверхности с созданием давления за счёт разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР)

1 – керн катода; 2 – фольга эмиттера; 3 – кольцевые секторы; 4 – корпус;  $\delta$  – исходный зазор.

Между свариваемым узлом и наружным цилиндрическим корпусом из материала с низким ТКЛР, чаще всего молибдена, вставляются сектора из материала с высоким температурным расширением (обычно сталь 12X18H10T).

Для получения качественных соединений в каждом случае необходимо наличие при сборке определенного зазора  $\delta$  между катодом и кольцевыми секторами, т.к. при сборке деталей в приспособлении без зазора при нагреве сразу же возникает давление сжатия, что затрудняет очистку соединяемых поверхностей в вакууме. Ведется сложный расчет из условия, что зазор полностью выбирается только при нагреве до температуры порядка 870 К.

Наличие зазоров между секторами приводит к непроварам по образующим цилиндра. Поэтому процесс ведут повторно, развернув узел на определенный угол. Цикл получения соединения длится около 10 часов. Появляющаяся остаточная деформация выводит приспособление из строя после получения одной катодной единицы. Получение же соединений эмиттера с керном по развитой поверхности ДС практически невозможно. К недостаткам ДС необходимо отнести также длительность высокотемпературного воздействия, что приводит к появлению в зоне соединения хрупких интерметаллидных фаз.

Интенсифицировать процесс диффузионной сварки охватывающих соединений можно используя магнитно-импульсную обработку, легко реализующую охватывающее усилие (схема «на обжим») [3]. Так же, как и при диффузионной сварке, процесс необходимо осуществлять с предварительным разогревом в вакууме для предотвращения окисления соединяемых поверхностей.

### **3.2. Принцип магнитно-импульсной сварки в вакууме (МИСВ)**

В отличие от классической магнитно-импульсной сварки нагрузка в новом методе [9, 49, 50] осуществляется по нормали к соединяемым деталям, кумулятивная очищающая струя, возникающая при косом соударении, отсутствует. Очистка поверхностей осуществляется за счет предварительной вакуумно-термической обработки. При этом магнитное давление в зоне соединения должно быть равномерным.

Схема устройства магнитно-импульсной сварки эмиссионных покрытий в вакууме приведена на рисунке 36 [41].

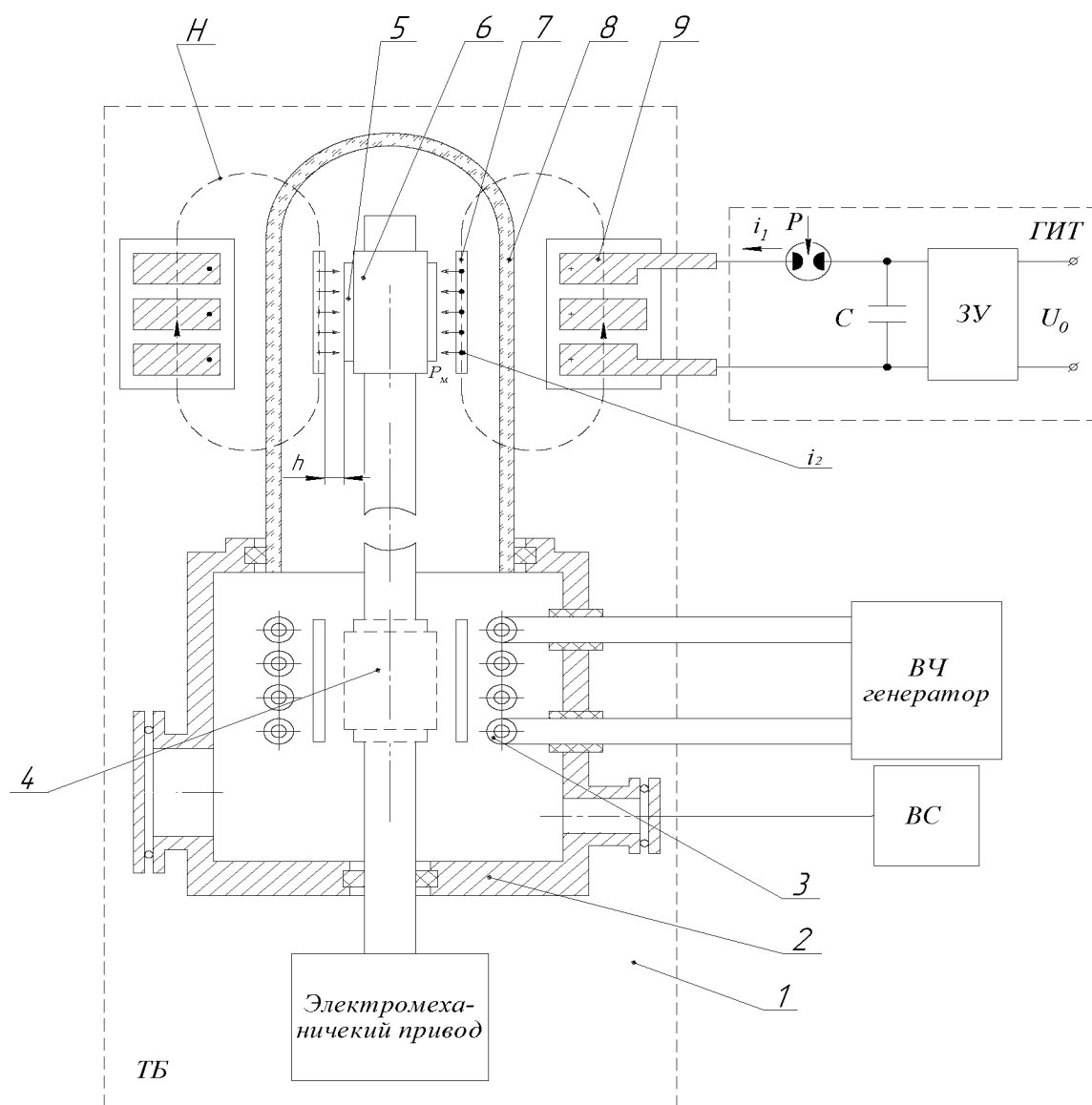


Рис. 36. Схема устройства вакуумно-термической магнитно-импульсной обработки. 1 – технологический блок (ТБ); 2 - вакуумная камера; 3 - индуктор высокочастотного разогрева; 4 – узел на позиции вакуумнотермической обработки; 5 - облицовка; 6 - основание ( в зоне магнитно-импульсного воздействия); 7 - спутник; 8 - кварцевый стакан; 9 – индуктор МИО; ВЧ - высоко частотный генератор; ВС - вакуумная система; ГИТ - генератор импульсных токов;  $U_0$  - напряжение сети; ЗУ - зарядное устройство; С - ёмкость; Р - коммутирующее устройство;  $i_1$  - разрядный ток;  $i_2$  - наведённый ток; Н - магнитный поток;  $P_m$  - магнитное давление, h-зазор между спутником и облицовкой.

При наварке тонкостенных облицовочных покрытий (часто незамкнутого контура) толщиной  $t_{\text{обл}} = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м из материалов с низкой электропроводностью (именно такими бывают чаще всего металло - сплавные эмиссионные покрытия) сварка осуществлялась с использованием одного из приемов магнитно-импульсной обработки - осуществления воздействия через передающую оболочку - "спутник" Использовались медные никелированные втулки с толщиной стенки  $t_{\text{сп}} = 2$  мм, выбранной из условия необходимого проникновения магнитного поля.

Процесс осуществляется следующим образом. Основание с облицовкой и спутником закрепляются на штоке электромеханического привода вакуумной камеры и вводится в зону индуктора высокочастотного разогрева. С помощью вакуумной системы в рабочем объеме создается необходимое разрежение. После этого включается ВЧ генератор. При достижении необходимой температуры узел переводится электромеханическим приводом в зону индуктора МИОМ.

Генератор импульсных токов разрезается на рабочий инструмент-индуктор. При взаимодействии с магнитным полем индуктора и индуцированными в спутнике токами возникает магнитное давление  $P_m$ . Оно сжимает спутник, который воздействует на эмиттер. Осуществляется сварка в твердой фазе [9]. В данном устройстве используется уникальная особенность магнитно-импульсной сварки, дистанционность воздействия через диэлектрический (кварцевый) стакан, который является частью вакуумной камеры. Свариваемый разогретый узел находится в вакууме, а индуктор МИО в атмосфере.

В результате постановочных экспериментов выявилось, что качество соединения зависит от тщательности предварительной подготовки соединяемых поверхностей, температуры предварительного разогрева, степени разрежения в рабочей камере, величины реализуемого магнитного давления.

По результатам проведенных экспериментов и литературного анализа методов получения соединений в твердой фазе с учетом специфики магнитно-

импульсной обработки металлов, были определены основные параметры процесса МИСВ таблица 9.

Таблица 9

Параметры процесса магнитно-импульсной сварки в вакууме

№ п/п	Наименование параметров	Размерность	Область определения	Природа ограничения
1	Давление в рабочей камере, В	Па (мм рт.ст.)	$0,66 \cdot 10^{-2}$ ( $5 \cdot 10^{-5}$ )	Возможности средств откачки установки МИСВ
2	Температура предварительного разогрева, T°	К	$800 < T^{\circ} < 1300$	Температура активации процесс; эффективность процесса
3	Энергия импульса магнитного поля, W	кДж	5÷17	Конструкция установки
4	Исходный зазор между «спутником» и свариваемым узлом, h	$10^{-3}$ м	$0,1 < h < 1,5$	Конструкция свариваемого узла; эффективность процесса
5	Толщина метаемого элемента «спутника», $t_{сп}$	$10^{-3}$ м	$I < t_{сп} \leq 2$	Разрушение «спутника»; эффективность процесса
6	Рабочая частота импульсов магнитного поля, $f_p$	кГц	5÷15	Время релаксации напряжений. Конструкция установки и инструмента

Качество соединений проверялось на механическую прочность, термостойкость, вакуумную плотность.

Соединения отвечают техническим требованиям предъявляемым к изделиям электронной техники. Были получены соединения тонкостенных облицовок по развитым поверхностям. В таблице 10 приведены металлы и сплавы, свариваемые магнитно-импульсной сваркой в вакууме с предварительным разогревом.

Магнитно-импульсная сварка в вакууме с предварительным разогревом (МИСВ) позволяет расширить технологические возможности способов сварки в твёрдой фазе. Метод позволяет получать нахлесточные телескопические соединения тонкостенных труб с конструкционными деталями из однородных и разнородных материалов, облицовку тонкостенными материалами цилиндрических деталей при соотношении ширины навариваемой полосы к диаметру основания  $\frac{1}{d} > 2$ , производить сварку по развитым поверхностям. Данным способом получены соединения различных металлов и сплавов, широко используемых в производстве изделий электронной технике (ИЭТ).

Таблица 10

Металлы и сплавы, соединяемые магнитно-импульсной сваркой в вакууме

Материал основания	Материал облицовки					
	Медь	Алюминий - барий	Платина	Платина - барий	Молибден	Никель
Медь	1000* 6.7**	950 6,7				1070 7,6
Молибден			1270 12	1120 13,2	1280 14	1170 10,2
Сталь				1120		



12X18H10T				10,2		
Сплав 29НК	1120	1020			1270	1170
	9,2	9,2			12	9,2
Сплав МН40А		920	970			970
		6,0	7,6			6,7
Ниобий			1370			
			13,3			
Никель	1020	1070				1070
	7,6	7,6				7,0

\* - температура, К; \*\* - энергия, кДж.

Таким образом, экспериментально была определена возможность использования импульсного магнитного давления для получения широкополосных облицовочных покрытий на цилиндрические основания, что позволило приступить к исследованию и разработке технологии получения катодных узлов вторичной эмиссии данным методом.

### 3.3. Анализ процесса МИСВ

Исследования влияния различных параметров на качество соединения осуществлялись на специальной лабораторной установке МИСВ [41]. Все экспериментальные образцы имели диаметр основания  $t_{\text{осн}} = 18 \cdot 10^{-3}$  м, ширина облицовочного покрытия  $l = 30 \cdot 10^{-3}$  м, толщина  $t_{\text{обл}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м, непроводящий зазор индуктор - обрабатываемый узел  $\Delta = 5 \cdot 10^{-3}$  м, число витков индуктора  $n=4$ .

В постановочных экспериментах исследовалось влияние степени разрежения на качество сварки. Свойства вакуума, как защитной среды, в первую очередь определяются количеством примесей в технологической среде. В таблице 11 приведено содержание кислорода и азота в зависимости от степени разрежения в рабочем объеме.

## Содержание кислорода и азота

Давление, Па	Содержание газов в единице объема		
	Всего, %	В том числе	
		O <sub>2</sub> , %	N <sub>2</sub> , %
10 <sup>5</sup>	100	20,1	79,0
10 <sup>2</sup>	0,13	0,03	0,1
10	0,013	0,003	0,01
1,0	0,0013	0,0003	0,001
10 <sup>-1</sup>	0,00013	0,00003	0,0001
10 <sup>-2</sup>	0,000013	0,000003	0,00001

Даже низкий вакуум около  $1 \cdot 10^{-2}$  Па по своим защитным свойствам лучше, чем технически чистый аргон, содержащий 0,05% O<sub>2</sub> и 0,23% N<sub>2</sub>. Состояние поверхности меди в зависимости от температуры и степени разрежения видно на рисунке 37. Для полного удаления окисных плёнок с поверхности меди параметры процесса (давление и температура) должны лежать в области III.

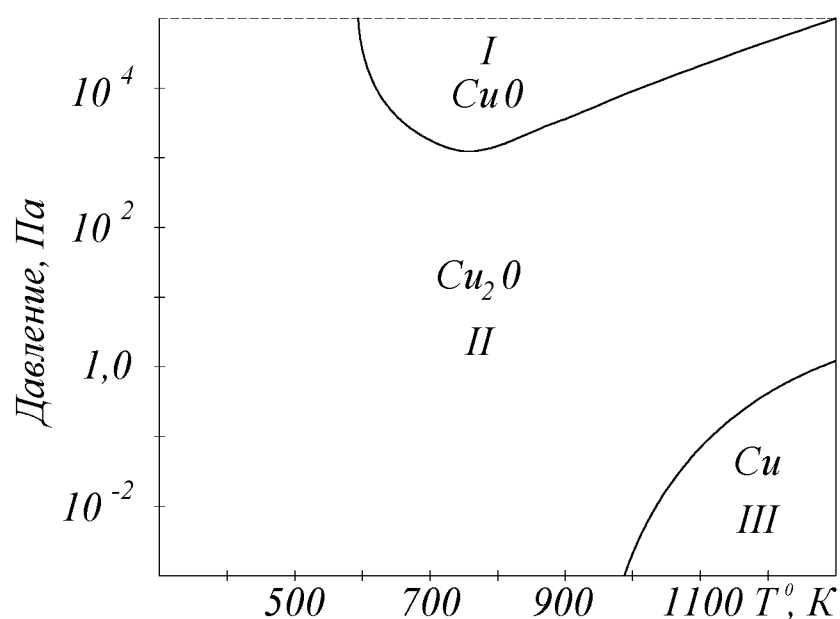


Рис. 37. Состояние окислов на поверхности меди в зависимости от температуры и степени разрежения.

Влияние вакуума в процессе МИСВ на качество соединения меди МБ с коваром 29НК показано в таблице 12. В дальнейших экспериментах степень разрежения принята неизменным параметром (не хуже  $0,66 \cdot 10^2$  Па). Данное разрежение вполне удовлетворительно при соединении металлов, широко используемых в электровакуумном производстве (Cu, Ni, 29НК, стали 12X18Н10Т, Мо, Pt, Nb и т.д.) и легко воспроизводится промышленными средствами откачки.

Разогревом в вакууме достигается очистка соединяемых поверхностей от адсорбированных и окисных включений [23].

Важной функцией разогрева является активация поверхностных слоев, что является предпосылкой к схватыванию, а так же снижение сопротивления деформированию и ускорение релаксации напряжения в зоне соединения.

Таблица 12

Результаты испытаний на герметичность, механическую прочность и термостойкость соединений меди МБ с коваром 29НК, полученных при различной степени разрежения

№ п/п	Давление, Па	Результаты термоиспытаний и металлографического анализа	Прочность на срез, $\tau$ н/м <sup>2</sup> 10 <sup>7</sup>	Натекание, $\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$
1	$1 \cdot 10$	Вспучивание	5	$1 \cdot 10^{-4}$
2	$5 \cdot 10^{-1}$	Вспучивание	7,5	$1 \cdot 10^{-4}$
3	$5 \cdot 10^{-2}$	Карманы и расслоения	11,5	$4 \cdot 10^{-6}$
4	$1 \cdot 10^{-2}$	Дискретный непровар	13,5	$1 \cdot 10^{-7}$
5	$5 \cdot 10^{-3}$	Карманов и расслоений нет	14,5	$5 \cdot 10^{-13}$
6	$1 \cdot 10^{-3}$	Карманов и расслоений нет	15,0	$5 \cdot 10^{-14}$
7	$5 \cdot 10^{-4}$	Карманов и расслоений нет	15,0	$1 \cdot 10^{-15}$

С точки зрения физики процесса магнитно-импульсного воздействия разогрев обрабатываемых деталей таит в себе два в какой-то степени компенсирующих друг друга фактора. С одной стороны, падает механическая прочность металлов, что облегчает деформацию деталей, снижая необходимое усилие обработки. С другой стороны, удельное сопротивление деталей, разогреваемых до температуры порядка 1300 К, увеличивается примерно в четыре раза. Это вызывает увеличение эквивалентного сопротивления и индуктивности системы "индуктор-заготовка", что, в конечном счёте, приводит к уменьшению магнитного давления, (см. рисунок 38, режим обработки и параметры инструмента: напряжение на накопителе  $U_0=3$  кВ, энергия импульса  $W = 6,75$  кДж, рабочая частота  $f_p=10$  кГц, число витков индуктора  $n=4$ , непроводящий зазор индуктор-заготовка  $\Delta = 5$  мм).

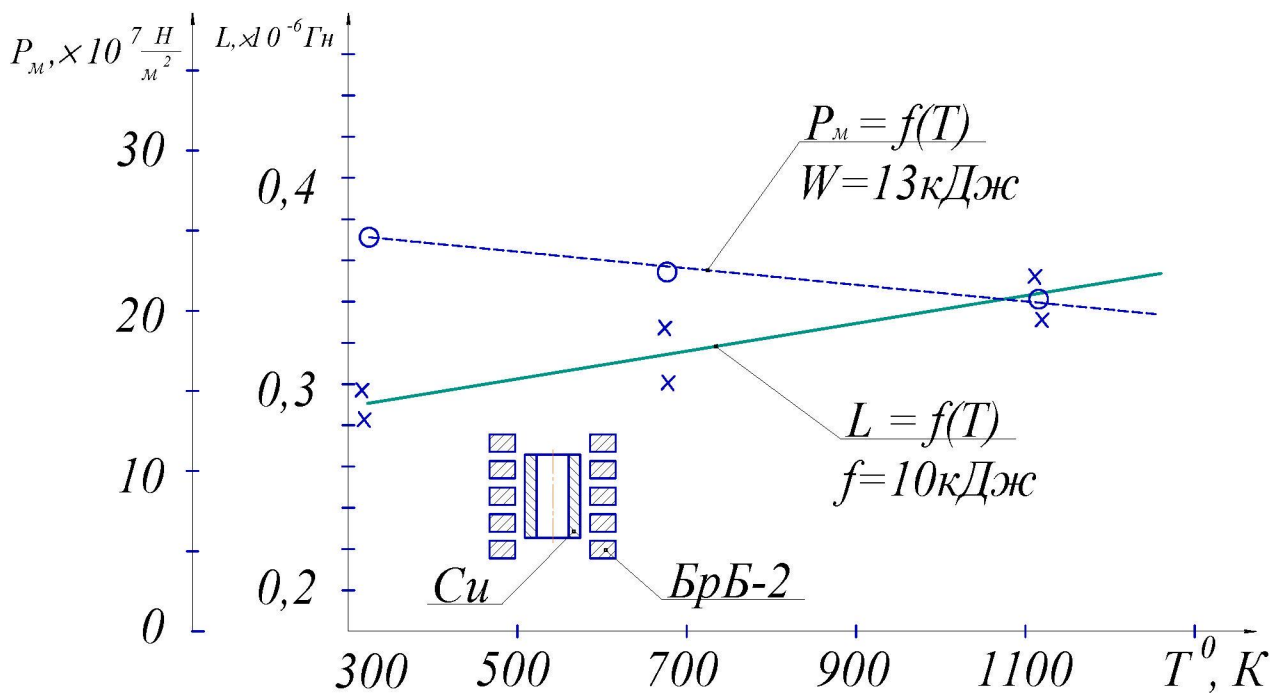


Рис. 38. Влияние температуры нагрева на величину индуктивности системы «индуктор-заготовка» и удельного электромагнитного давления  $P_M$ .

Влияние температуры сварки на получение качественного соединения никеля с молибденом показано на рисунке 39.

Верхний предел ограничения температурного интервала МИСВ связан с

оплавлением и разрушением метаемого элемента при перегреве, или появлением литых структур в зоне соединения, что ухудшает качество сварки и недопустимо при получении эмиссионных покрытий. Нижний предел связан с недостаточной активацией поверхностей, а так же, очевидно, с тем, что не успевают пройти релаксационные процессы и, в итоге, получить качественное соединение не удастся. Температура предварительного разогрева является изменяемым параметром при исследовании процесса сварки.

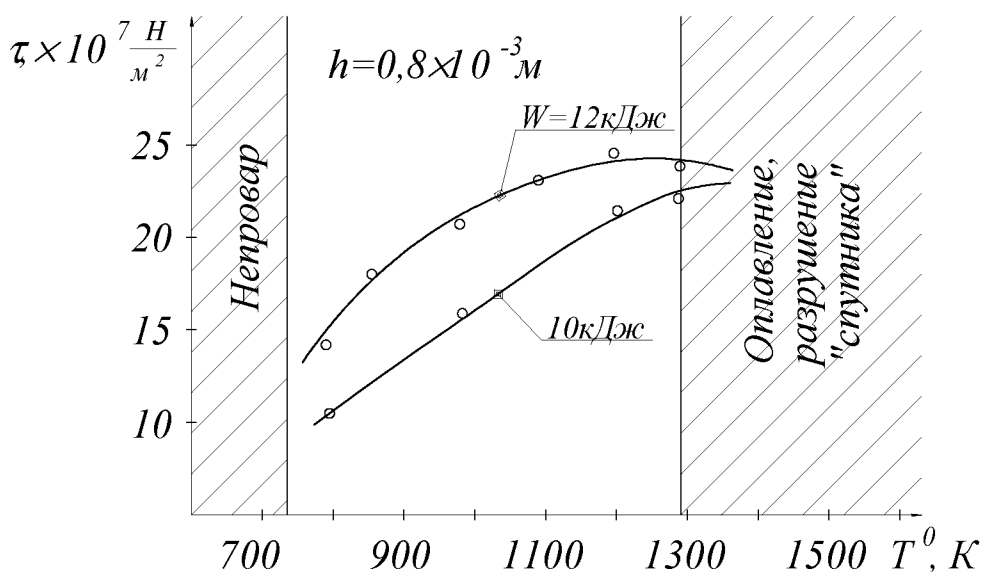


Рис. 39. Зависимость прочности соединения никеля с молибденом от температуры предварительного разогрева

Давление при МИСВ, как и при других способах сварки в твердой фазе является основным фактором получения физического контакта и активации соединяемых поверхностей. Характер изменения сварочного давления зависит в процессе МИСВ от энергии магнитного воздействия  $W$ , зазора между индуктором и "спутником"  $\Delta$ , исходного зазора между "спутником" и свариваемым узлом  $h$ , частоты разрядного тока  $f_p$ .

Рабочая частота импульсов  $f_p$  зависит от конструкции установки и в серии постановочных экспериментов являлась неизменным параметром ( $f_p = 10 \text{ кГц}$ ). Данное значение выбрано по результатам оценочных расчетов в

обеспечение условия, что длительность первой полуволны магнитного давления должна быть больше времени релаксации напряжений соединяемых материалов в зоне сопряжения.

Зависимость прочности на срез  $\tau$  соединения никеля с коваром от энергии импульса  $W$  приведена на рисунке 40. Малая энергия не позволяет осуществить физический контакт и необходимую совместную деформацию. Ограничение энергии "сверху" связано с разрушением метаемого спутника и недопустимой деформацией свариваемого узла.

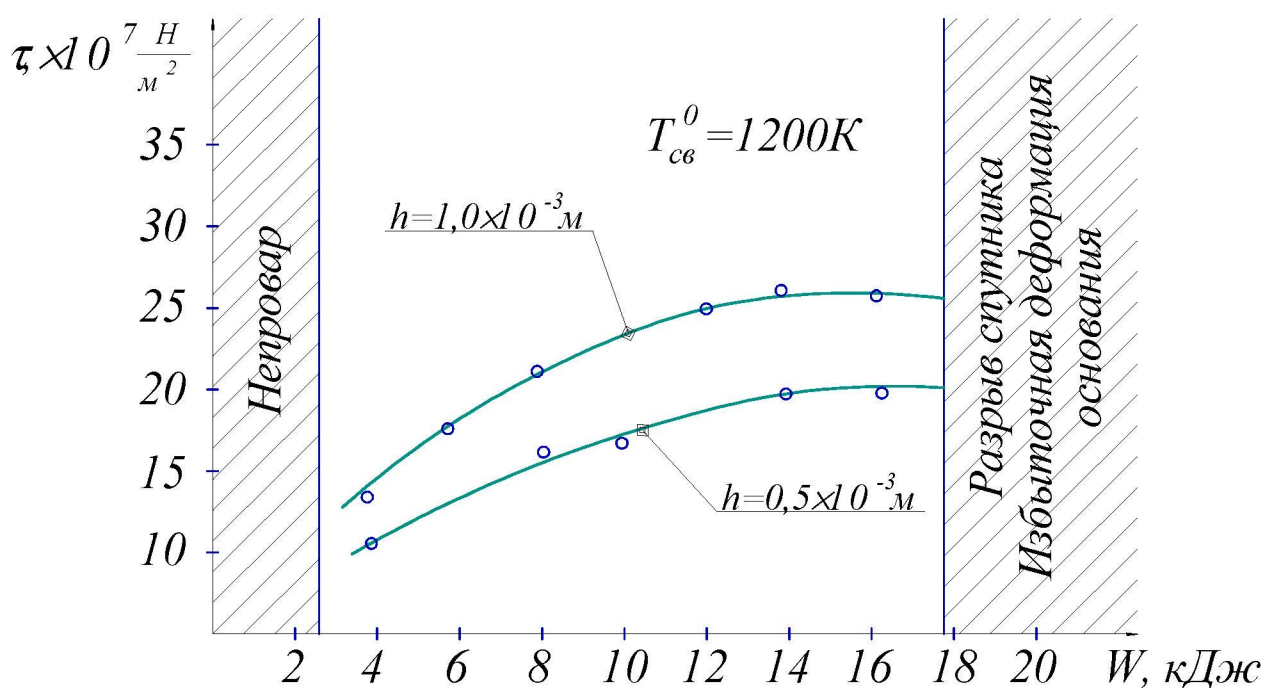


Рис. 40. Зависимость прочности соединения никеля с коваром 29НК от энергии импульса  $W$

Исходный зазор «спутник» - свариваемый узел  $h$  также влияет на характер взаимодействия и, как следствие, на качество соединения. Зависимость прочности молибдена с никелем от исходного зазора приведена на рисунке 41.

Температура процесса  $T^0$ , энергия заряда накопителя установки  $W$  и исходный зазор  $h$ , являлись переменными параметрами при определении оптимальных режимов магнитно-импульсной сварки различных пар металлов.

Экспериментальные режимы сварки пары молибден - никель (облицовка) приведены в таблице 13.

В результате проведенных предварительных экспериментальных исследований установлены области определения и эффективного варьирования основных параметров процесса. Для различных свариваемых пар металлов они имеют значения: температура предварительного разогрева  $T^0 = 850 + 1300$  К; исходный зазор  $h = 0,5 \div 1,5 \cdot 10^{-3}$  м; энергия импульса  $W = 5 + 17$  кДж.

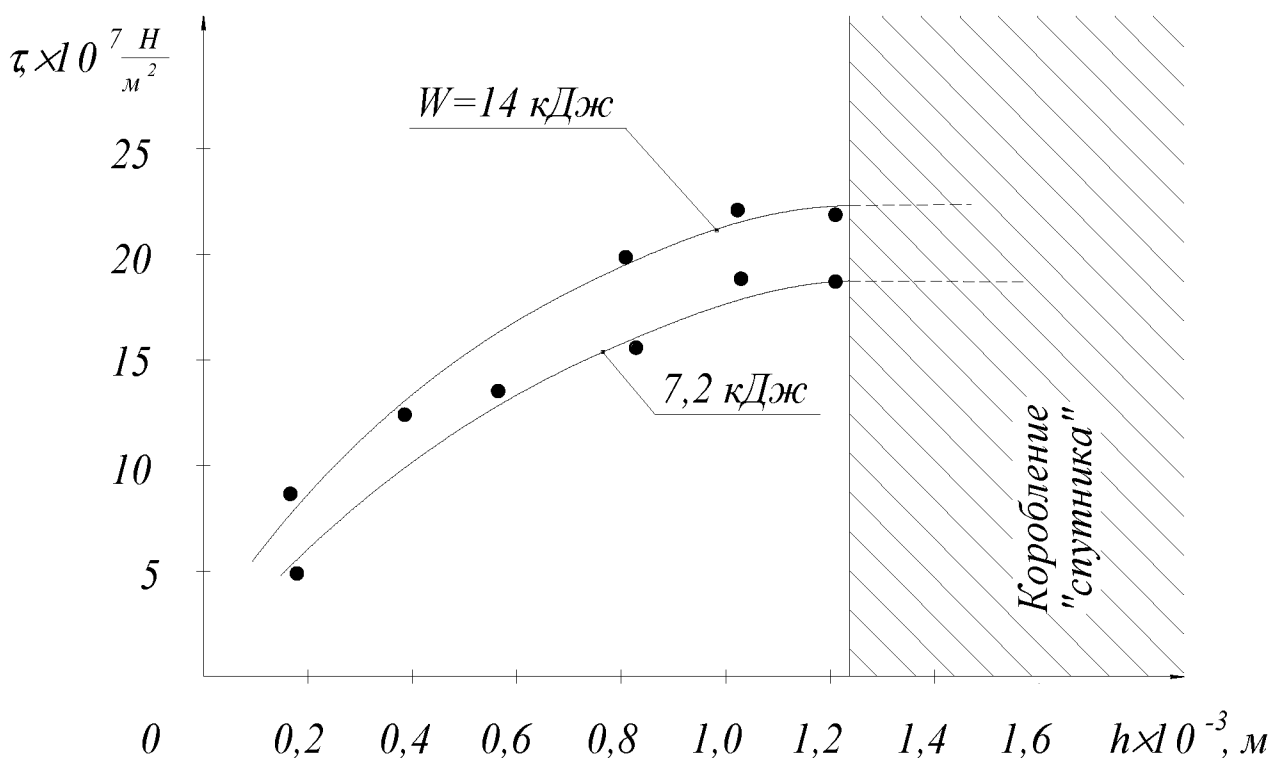


Рис. 41. Зависимость прочности соединения Mo+N<sub>i</sub> от исходного зазора «спутник» - свариваемый узел h

Оценка качества соединений, полученных методом МИСВ, производилась по результатам различных испытаний: многократным циклическим нагревом; проверкой на герметичность; механическим испытанием; металлографическим анализом полученных соединений.

Термические испытания заключались в 10-ти кратном нагреве до  $700 + 1300$  К в вакууме или водородной печи с выдержкой при заданной

температуре 15-20 мин. После проведения термоциклов в случае некачественного соединения происходило отслоение материала облицовки. Проверка на натекание осуществлялась на гелиевом течеискателе ПТИ-10.

Образцы проверялись на герметичность до и после термоциклирования.

Таблица 13

Экспериментальные режимы МИСВ пары молибден-никель

№ п/п	Параметры процесса			Прочность на срез, $\tau \cdot 10^7$ н/м <sup>2</sup>
	T°, К	W, кДж	h, $10^{-3}$ м	
1	1070	8,67	0,1	7,5
2	1070	12	0,4	12,5
3	1070	8,67	0,75	11,25
4	1070	12	1,0	15,0
5	1120	10,26	0,1	10,0
6	1120	12,0	0,4	15,0
7	1120	10,26	0,75	18,75
8	1120	12	1,0	18,75
9	1170	8	0,5	18,75
10	1170	10,26	0,5	20,25
11	1170	12	0,5	21,25
12	1170	13,23	0,5	22,5
13	1220	12	0,1	15,0
14	1220	12	0,25	18,75
15	1220	12	0,4	20,0
16	1220	12	1,0	22,5
17	1270	12	0,25	21,25



18	1270	13,23	0,25	22,5
19	1270	12	0,75	22,5
20	1270	13,23	1,0	25,0

Механические испытания соединений осуществлялись на срез. На основание наваривалась узкая полоска облицовочного материала по образующей цилиндра. Затем производился надрез для осуществления отрыва небольшой площадки шириной, соизмеримой с толщиной облицовочного материала.

В случае получения качественного соединения после отрыва, при рассмотрении под микроскопом, наблюдается картина частичного отрыва металла основания - "кратеры" и частичные следа облицовки на основании.

Металлографические исследования зоны соединения не выявили образования общих зерен при сварке однородных металлов и новых фаз при сварке разнородных материалов.

Результаты испытаний на прочность, герметичность, термостойкость, микроструктурный анализ соединений подтверждают гипотезу, возникшую из чисто физических соображений о сильной корреляции измеряемых величин. Следовательно, качество изделия можно эффективно оценивать по результатам одного из вышеперечисленных испытаний. При этом естественно выбрать наиболее выразительную величину, измеряемую наиболее просто. Анализ показывает, что такой величиной является прочность соединения на срез  $\tau$ , которая принята за параметр оптимизации при экспериментальных исследованиях.

Основными процессами магнитно-импульсной сварки являются - метание проводника, помещенного в магнитное поле индуктора и процесс твердофазного взаимодействия соединяемых поверхностей. Первое явление аналитически описывается уравнениями электродинамик [10], топохимические реакции рассматриваются теорией сварки в твердой фазе [27, 37].

С целью развития теории и расширения представлений о процессе МИСВ

применены численные расчёты параметров процесса метания облицовки с использованием вычислительной техники [10], которые заменяют трудновыполнимые эксперименты и позволяют сократить трудоемкость оптимизации режимов сварки. Расчеты позволяют осуществлять одновременный контроль и фиксацию многих факторов, вскрывающих наиболее общие закономерности внутреннего механизма процесса. Достоверность расчетов зависит от правильности выбора математической модели, позволяющей учесть основные особенности процесса: импульсный характер электромагнитного поля, проникновение последнего во все проводники системы, движение метаемого элемента, влияние разрядного контура магнитно-импульсной установки и т. д.

Известные математические модели магнитно-импульсной обработки можно условно разделить на два вида: цепные модели, полевые модели. Цепные модели основаны на применении теории электрических цепей с сосредоточенными параметрами, а полевые - на теории электромагнитного поля.

Недостатком цепных моделей является трудность учета импульсного характера электромагнитного процесса и влияния основания узла.

В основе полевых моделей лежит решение задачи о проникновении импульсного электромагнитного поля в проводящие элементы системы, включая движущуюся заготовку.

Для расчетов метания магнитным полем "спутника" в процессе получения вторично эмиссионных катодов была использована полевая математическая модель магнитно-импульсной обработки описанная в работе [10].

Данная математическая модель была использована для расчетов с применением вычислительной техники режимов магнитно-импульсной сварки широкополосных облицовочных покрытий. Цель расчетов - выявление временных зависимостей тока в разрядной цепи установки, напряженности магнитного поля и магнитного давления в рабочем зазоре индуктор-"спутник" и

в зоне соединения, перемещения спутника.

В качестве примера в таблице 14 приведены варьируемые исходные данные и результаты расчётов параметров процесса МИСВ. В расчётах учитываются постоянные параметры разрядного контура установки и инструмента: емкость накопительного блока  $C = 1800 \cdot 10^{-6}$  Ф; собственная индуктивность  $L_y = 114 \cdot 10^{-9}$  Гн; собственное сопротивление  $r_y = 1,7 \cdot 10^{-3}$  Ом; число витков индуктора  $n = 5$  и ширина рабочей зоны индуктора  $b_u = 50 \cdot 10^{-3}$  м. Учтены так же электрофизические характеристики материалов индуктора, оснастки и элементов свариваемого узла и температуры предварительного разогрева  $T^0 = 1100$  К.

Таблица 14

Исходные данные и результаты расчетов параметров прочеса МИСВ

Наружный радиус оболочки $10^{-1}$	Радиус основания $10^{-2}$	Внутренний радиус оболочки $10^{-2}$	Наружный радиус оболочки $10^{-1}$	Внутренний радиус индуктора $10^{-1}$	Ток в индукторе $10^8$ , А	Длительность первой полуволны импульса тока $T/2$ $10^{-6}$ , с	Напряжённость магнитного поля на наружной поверхности оболочки, $10^8$ , А/м	Время соударения $10^{-6}$ , с	Скорость оболочки, м/с	Напряжённость магнитного поля на наружной поверхности оболочки, $10^8$ , А/м
1	0,9	0,95	0,115	0,175	0,206	84	0,206	21,8	84	0,0162
2	0,9	0,1	0,115	0,175	0,202	86	0,202	24,4	139	0,0617

3	0,9	0,11	0,13	0,175	0,201	82	0,201	30,0	197	0,106
4	0,9	0,1	0,11	0,175	0,198	88	0,198	22,4	148	0,080
5	0,9	0,105	0,12	0,175	0,201	86	0,201	26,8	177	0,084
6	0,9	0,95	0,115	0,15	0,250	66	0,250	16,8	105	0,018
7	0,9	0,115	0,115	0,15	0,242	68	0,242	19,0	173	0,060

Результаты расчетов показывают, что для процесса магнитно-импульсной сварки по схеме с нормальным соударением появляется характерная особенность, отличающая этот процесс от типового процесса МИС - усиление магнитного поля в зазоре между оболочкой и основанием обусловленное сжатием магнитного потока.

Сопоставление расчётных параметров МИСВ с экспериментальными значения представлены в таблице 15.

Таблица 15

Сопоставление расчётных параметров МИСВ с экспериментальными данными

№ п/п	Величины	Единицы измерения	Расчётные данные	Экспериментальные данные	Расхождение, %
1	Длительность первой полуволны импульса тока T/2, с	$10^{-6}$	84	78	7,1
2	Амплитуда импульса	$10^8$	0,206	0,215	4,4

	напряженности магнитного поля в индукторе $H_{2 \max}$ , А/м				
3	Амплитуда импульса тока в разрядном контуре $J_{\max}$ , А	$10^6$	0,206	0,230	11,65
4	Амплитуда компрессированного магнитного поля в момент соударения $H_{2 \max}$ , А/м	$10^8$	0,0617	0,058	6,0
5	Момент времени соударения спутника с облицовкой $t_{уд}$ , с	$10^{-6}$	21,8	21,0	3,7

Факторы, обеспечивающие эффективное проведение процесса находятся между собой в сложной зависимости. Повышение температуры предварительного разогрева позволяет вести процесс при меньших удельных давлениях, но требует использования специальных мер защиты индуктора, что приводит к увеличению непроводящего зазора  $\Delta$  и, как следствие, к увеличению запасаемой энергии установки. Увеличение емкости накопительного блока позволяет значительно снизить рабочее напряжение, при заданной запасаемой энергии накопительного блока, но приводит к уменьшению частоты разряда  $f_p$ , т.е. к увеличению длительности взаимодействия [3].

### 3.4. Экспериментальное оборудование инструмент и оснастка

При разработке оборудования магнитно - импульсной сварки необходимо, с одной стороны, наилучшим образом удовлетворить требования, связанные с технологией процесса, с другой стороны - обеспечить определенную комбинацию основных конструктивных параметров установки и режимов её работы.

Экспериментальная установка МИСВ была оснащена средствами измерения разрядного тока, напряженности магнитного поля и скоростной

регистрации перемещения спутника [71]. Блок-схема лабораторной установки с измерительной камерой приведена на рисунке 42.

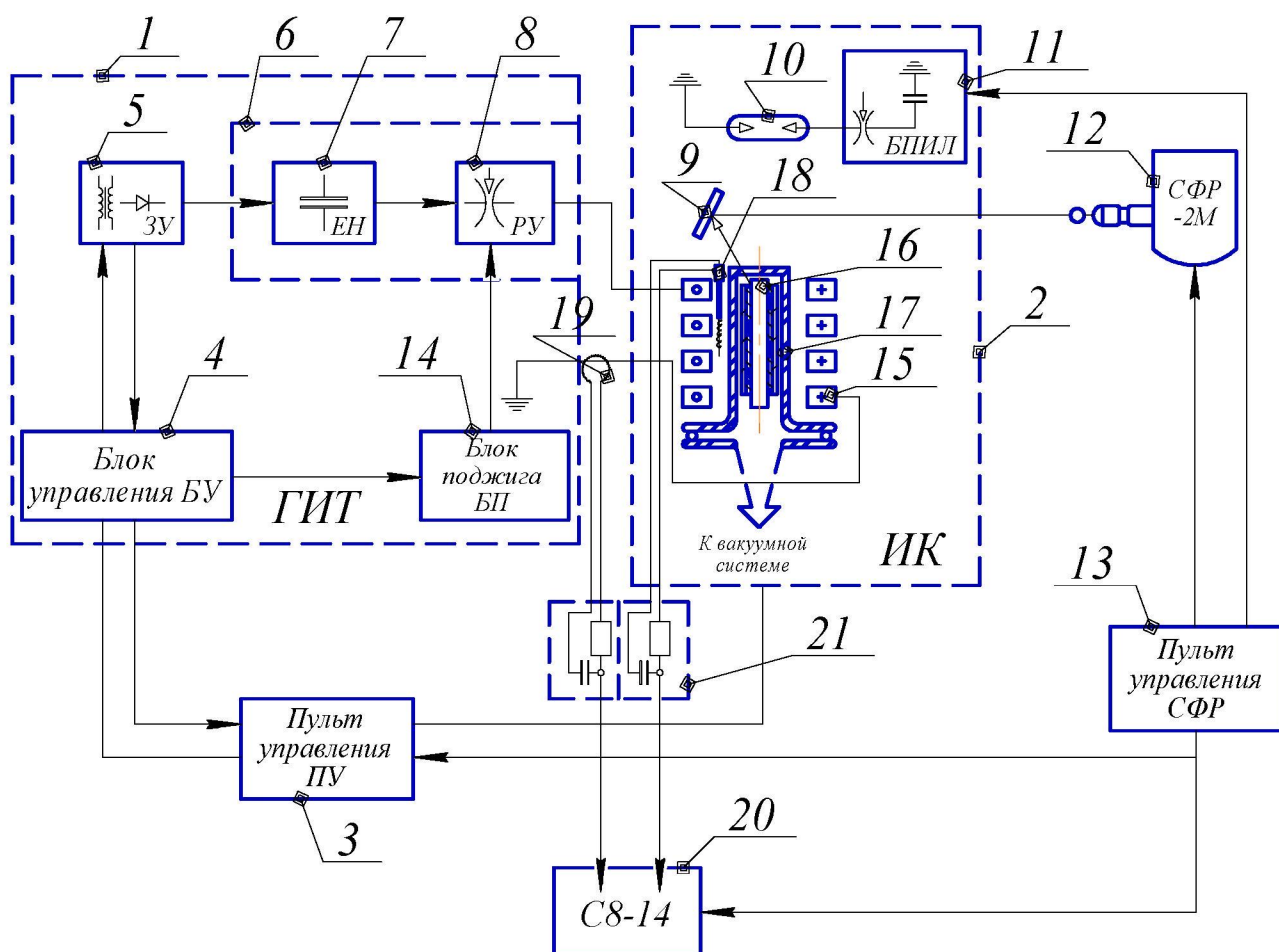


Рис. 42. Блок-схема экспериментальной установки

1 – генератор импульсных токов (ГИТ); 2 – измерительная камера (ИК); 3 – пульт управления (ПУ); 4 – блок управления (БУ); 5 – зарядное устройство (ЗУ); 6 – блок накопительный; 7 – ёмкостный накопитель (ЁН); 8 – разрядное устройство (РУ); 9 – зеркало; 10 – импульсная лампа; 11 – блок питания импульсной лампы (БПИЛ); 12 – камера скоростного фоторегистратора СФР - 2М; 13 – пульт управления СФР-2М; 14 – блок поджига (БП); 15 – индуктор МИО; 16 – обрабатываемый узел; 17 – стеклянный контейнер; 18 – датчик магнитного поля; 19 – пояс Роговского; 20 – запоминающий двухлучевой осциллограф С8-14; 21 – интеграторы.

Одним из основных элементов установки, конструкция которого влияет на параметры процесса, является индукторный узел. Индуктор - основной инструмент МИСВ должен обеспечивать необходимое электродинамическое воздействие на обрабатываемый узел и обладать экономически целесообразной стойкостью.

Первое требование обеспечивается подбором оптимальных параметров спирали применительно к заданным условиям сварки и характеристикам магнитно-импульсной установки. Удовлетворение второму требованию является наиболее трудной задачей, так как индукторы во время работы находятся в сложных условиях интенсивного механического и теплового нагружения при обработке узлов разогретых в вакууме до температуры  $900 \div 1300$  К.

Условия формирования соединения большинства металлов, используемых в ИЭТ, а именно, протекание релаксационных процессов в ходе МИСВ, требуют обеспечения длительности эффективного магнитного давления  $30 \div 70 \cdot 10^{-6}$  с. Это соответствует величине рабочей частоты разряда в контуре установки  $5 \div 15$  кГц. Учитывая, что длина зоны обработки катодных узлов больше диаметра основания и технологические требования по частоте разряда тока, целесообразно применение для устройств МИСВ многовитковых индукторов. Спирали многовитковых индукторов могут быть навиты из шин, изготовлены из цельной заготовки механической обработкой или набраны из пластинчатых секций [3].

Стойкость индуктора в значительной степени зависит от качества применяемой изоляции, ее электрической и механической прочности. Для конструкций инструмента, предназначенного для обработки разогретых деталей в высоком вакууме порядка  $0,6 \cdot 10^{-2}$  Па, к обычным требованиям механической и электрической прочности изоляции прибавляются специфические требования низкого газовыделения.

Наилучшие эксплуатационные характеристики при горячей магнитно-импульсной обработке в вакууме показала композиционная изоляция -

эпоксидный компаунд с наполнителем (кварцевый песок) с замуровкой обезвоженной слюды, типа мусковит. Однако использование такой композиции не позволяет осуществлять процесс при температуре свыше 900 К в результате разрушающего термического воздействия на инструмент.

Влияние температуры предварительного разогрева свариваемого узла на стойкость инструмента ( $N_{ц}$  - число циклов до разрушения изоляции) приведена на рисунке 43.

Данная зависимость имеет место при непроводящем зазоре индуктор - обрабатываемый узел  $\Delta$  равном  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м.

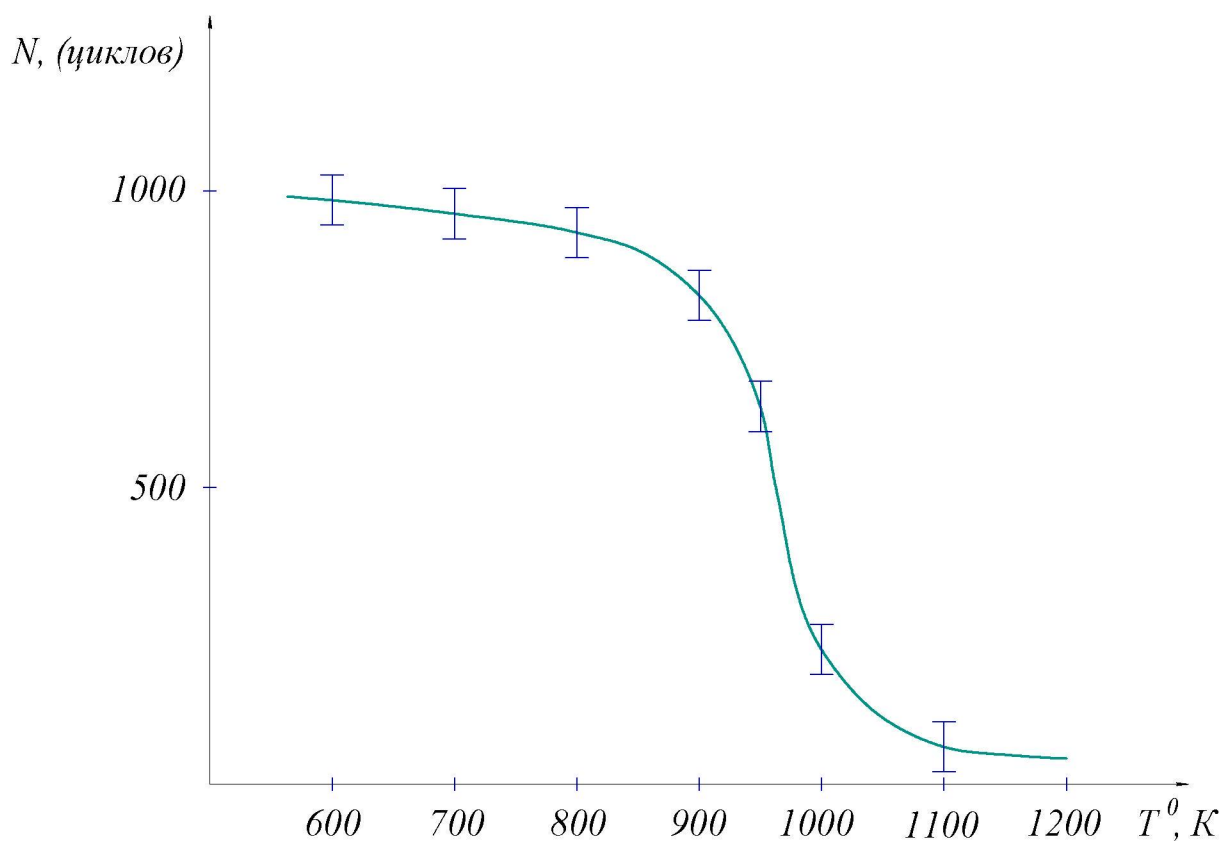


Рис. 43. Влияние температуры предварительного разогрева на стойкость индуктора

Увеличение  $\Delta$  приводит к повышению стойкости инструмента, однако для обработки при температурах 1000÷1200 К необходимый непроводящий зазор достигает значений  $6 \div 7 \cdot 10^{-3}$  м. При таких зазорах становится



конструктивно выполнимой и целесообразной схема с расположением индуктора в атмосфере, позволяющая повысить стойкость инструмента. Индуктор отделен от технологического объема термостойким, вакуумноплотным диэлектрическим (кварцевым или керамическим) стаканом. Расположение инструмента в атмосфере позволило также использовать различные системы бандажирования.

Увеличение непроводящего зазора  $\Delta$  влечет за собой уменьшение эффективности магнитного воздействия. Расчетные зависимости значений магнитного давления  $P_M$ , индуктивности и активного сопротивления системы индуктор-заготовка  $R_{и-з}$  и  $L_{и-з}$  рабочей частоты  $f_p$ , и удельного импульса первой полуволны магнитного давления  $J_M$  приведены на рисунке 44.

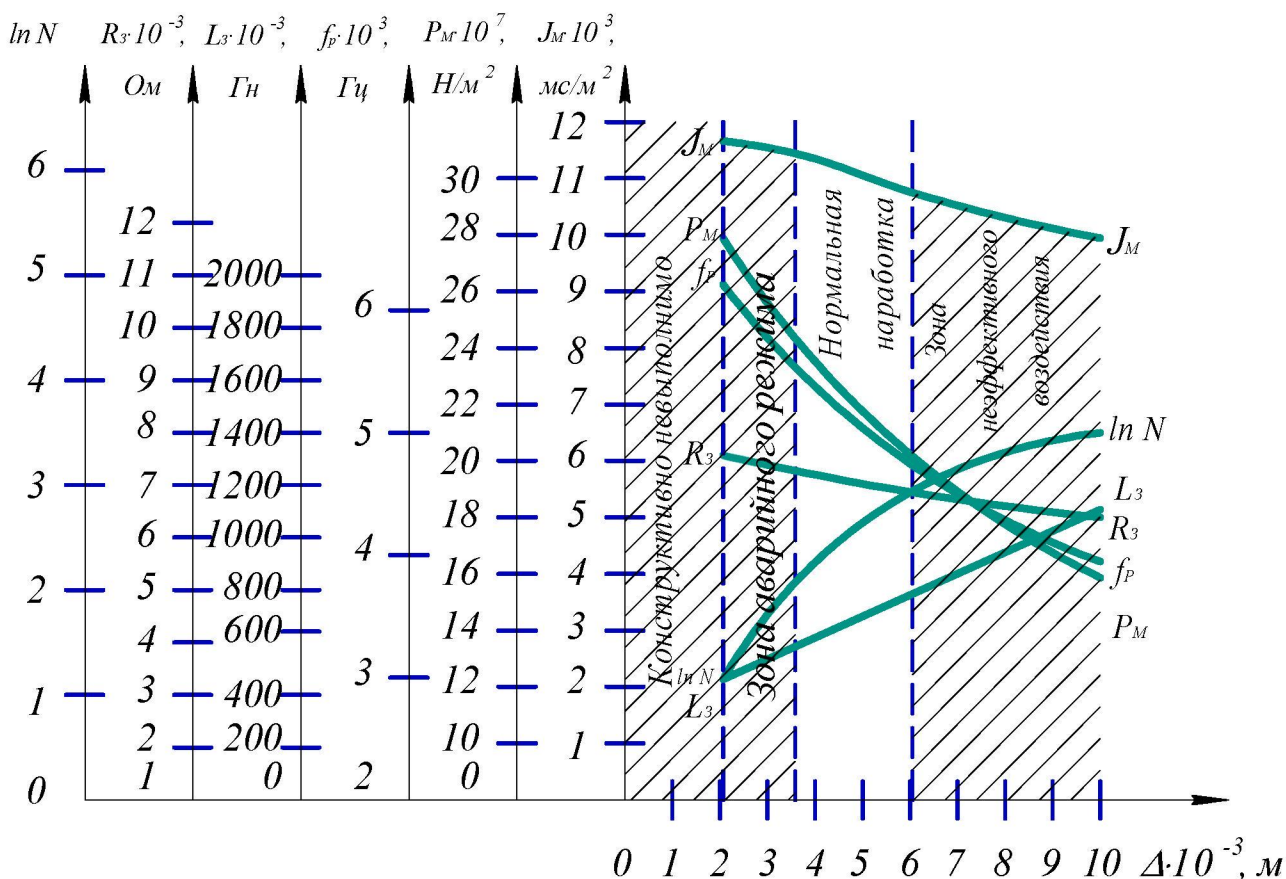


Рис. 44. Зависимость характеристик процесса магнитно-импульсного воздействия от непроводящего зазора  $\Delta$

$P_M$  - магнитное давление;  $R_{и-з}$ ,  $L_{и-з}$  - индуктивность и сопротивление системы индуктор-заготовка;  $J_M$  - удельный импульс магнитного давления;  $f_p$  - рабочая частота;  $N_u$  - наработка на отказ

При расчете учитывалось: число витков индуктора  $n = 4$ , диаметр индуктора  $D_u = 30 \cdot 10^{-3}$  м, длина рабочей зоны  $l_u = 45 \cdot 10^{-3}$  м, ёмкость накопителя установки  $C = 1500 \cdot 10^{-6}$  Ф, напряжение на накопителе  $U_n = 5$  кВ.

Анализ расчетных данных позволил определить конструктивно выполнимую и обеспечивающую надежную работу расположенного в атмосфере инструмента зону непроводящего зазора  $\Delta$ , равную  $4 \div 6 \cdot 10^{-3}$  м.

Для осуществления магнитно-импульсной сварки в вакууме были разработаны и исследованы следующие типы многовитковых индукторов:

1. Индукторы с витыми (из медной шины) катушками. Использовались комбинированные осевые и радиальные бандажы из диэлектрических (стеклотекстолит) и металлических материалов [3, 52].

2. Индукторы с точеной катушкой рисунок 45.

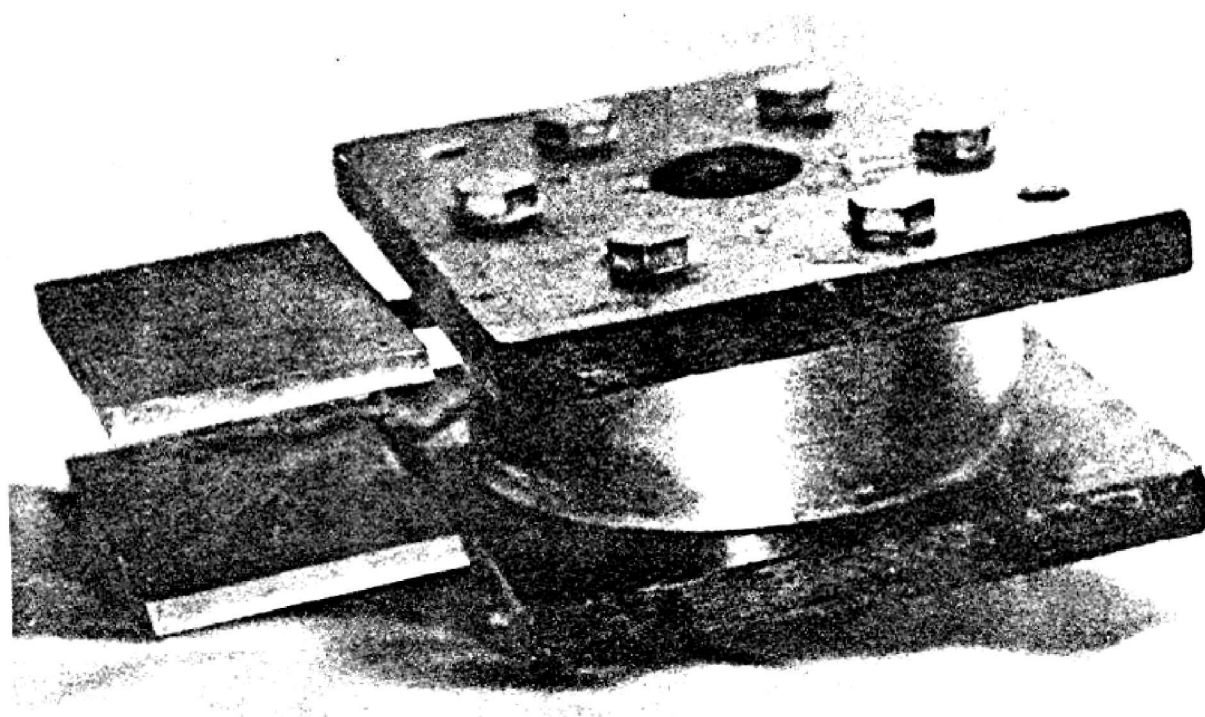


Рис. 45. Индуктор с точеной катушкой

3. Секционированные пластинчатые индукторы со стеклотекстолитовым осевым бандажом рисунок 46.

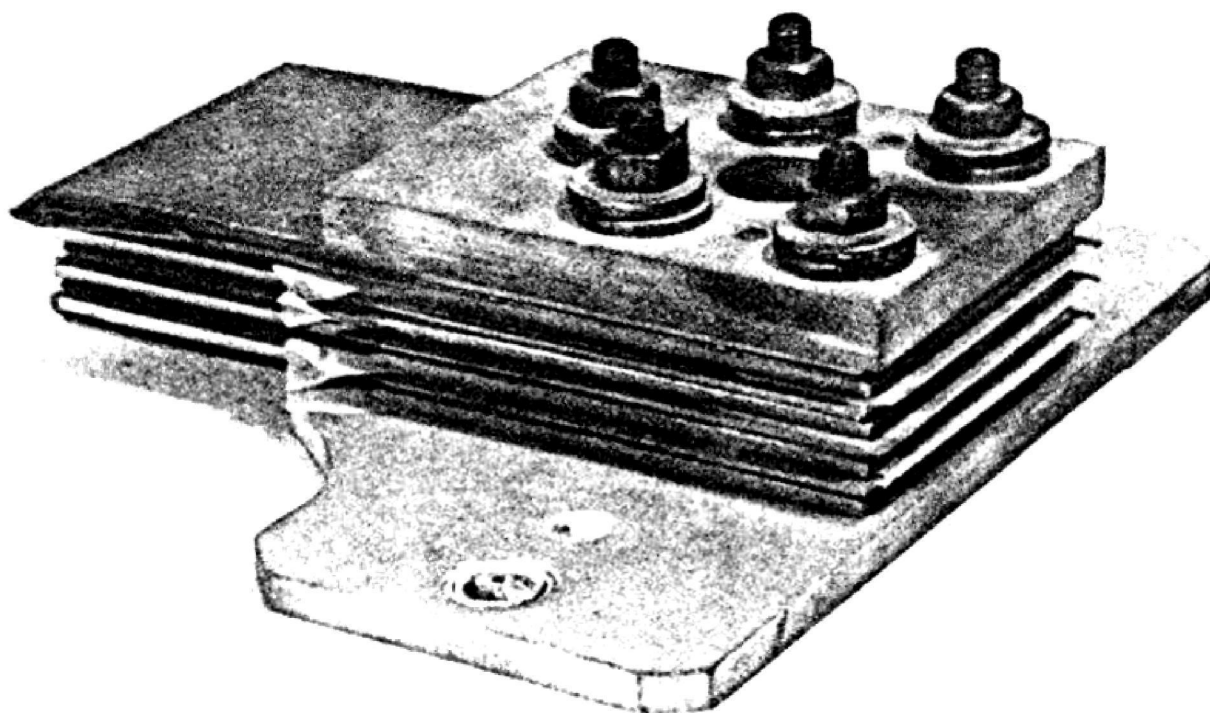


Рис. 46. Секционированный пластинчатый индуктор

Разработанные типы индукторов оценивались по следующим критериям: наименьшая индуктивность  $L_{и-з}$  и приведенное активное сопротивление  $R_{и-з}$  системы индуктор-заготовка, среднестатистическая наработка на отказ  $N_{и}$  и стоимость инструмента  $C_{и}$ . Характеристики индукторов определялись экспериментально осциллографированием осевой компоненты напряженности магнитного поля в рабочей зоне. Различие характера разряда связано с различной индуктивностью токоподводов и вносимыми потерями электропроводных усиливающих элементов (бандажей), теоретически учесть которые практически невозможно.

Значения различных характеристик индукторов приведены в таблице 16. Наилучшие характеристики у пластинчатого индуктора, токоподводы которого обладают наименьшей паразитной индуктивностью. Несмотря на сравнительно низкую стойкость данный индуктор технологичен и прост в изготовлении, имеет наименьшую стоимость и рекомендован для использования в установках МИСВ.

## Характеристики различных индукторов магнитно-импульсной сварки

№ п/п	Вид индуктора	$L_{и-з},$ нГн	$R_{и-з}, \cdot 10^{-3}$ Ом	$N_{и-з},$ имп.	$C_{и-з},$ руб
1	Пластинчатый	166	2,2	500	1000
2	Витой с диэлектрическим бандажом	696	3,3	10	1300
3	Витой с металлическим бандажом	638	5,8	>1000	3500
4	Точёный с совмещенным токопроводом бандажом	179	3,9	>1000	4600

Для обеспечения одного из основных требований при реализации схемы с "лобовым" соударением применительно к МИСВ были разработаны и исследованы специально индукторы, обеспечивающие равномерность магнитного поля в рабочей зоне с отклонением не более 5%. Многовитковая токопроводящая катушка данного инструмента при постоянном межвитковом зазоре, определяемом механической и электрической прочностью изоляции, выполнена "с переменным шагом [75] (рис. 47), изменяющимся по закону:

$$t_{var} = \frac{H(x)}{H_{max}} \cdot t_{ou} \quad (19)$$

где:  $t_{ou}$  - постоянный шаг индуктора, обеспечивающего напряженность магнитного поля  $H_{max}$ ;

$H(x)$  - распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре (определяется экспериментально).

Использование индуктора с переменным шагом делает возможным осуществление схемы с нормальным нагружением во всей зоне обработки, что позволяет получить качественную сварку по всей поверхности соединения. Это

очень важно при получении эмиссионных покрытий катодных узлов, эксплуатируемых в условиях интенсивной электронной бомбардировки.

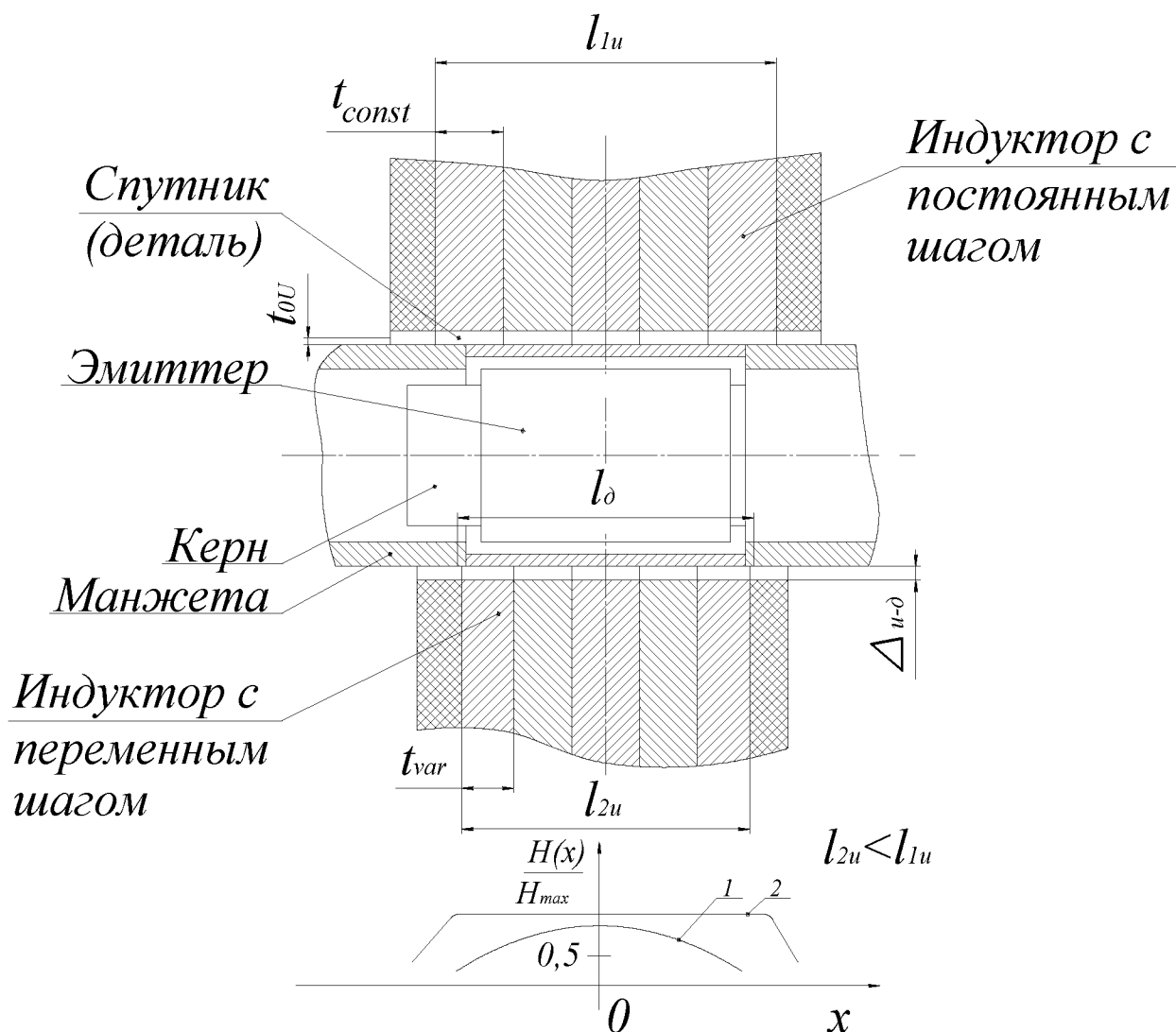


Рис. 47. Распределение магнитного давления в индукторе с нормальным и переменным шагом витков

$t_{var}$  - переменные витки индуктора;  $t_{const}$  - постоянные витки индуктора;  $\Delta_{u-\delta}$  - зазор между индуктором и деталью;  $l_{1u}$  - длина витков индуктора с постоянным шагом;  $l_{2u}$  - длина витков индуктора с переменным шагом;  $l_\delta$  - длина детали

### 3.5. Разработка технологии МИСВ катодных узлов

Катод вторичной эмиссии является типичным узлом ИЭТ, изготовление

которого целесообразно методом магнитно-импульсной сварки в вакууме. Предварительный разогрев в вакууме позволяет осуществлять по схеме с нормальным нагружением наварку на цилиндрический керн катода тонкостенного эмиттера из металлов и сплавов CuLi, AlBa, Pt, PtBa, PdBa и т. д.

В современных электровакуумных приборах используются катодные узлы диаметром от 5 до  $100 \cdot 10^{-3}$  м, ширина навариваемой полосы  $5 \div 80 \cdot 10^{-3}$  м. Толщина эмиттера  $t_s = 0,05 \div 0,2 \cdot 10^{-3}$  м. Проведенный расчёт необходимой рабочей частоты обработки показал, что для осуществления МИСВ эмиссионных покрытий "чистым" полем необходима установка с генератором импульсов тока, обеспечивающего рабочую частоту порядка  $800 \div 1000$  кГц.

Создать промышленную установку с данными параметрами на базе стандартных конденсаторов не представляется возможным. Поэтому сварка производилась с использованием медных «спутников» толщиной  $t_{сп} = 2 \cdot 10^{-3}$  м [3].

Расчеты показали, что необходимая частота обработки не превышает 5 кГц. Отработка режимов производилась на модернизированной установке МИСВ «Импульс-БМ» [70].

В качестве примера ниже приведены результаты расчета термодинамических параметров процесса сварки палладиво-бариевого эмиттера толщиной  $0,15 \cdot 10^{-3}$  м на керн из стали 12X18H10T диаметром  $d = 20 \cdot 10^{-3}$  м.

Вакуум в рабочем объеме выбираем  $0,66 \cdot 10^{-2}$  Па. Температура процесса ограничена материалом «спутника» и принята равной 1170 К лимитирующим для данной свариваемой пары является материал - керн – стали 12X18H10T при температуре 1170 К. Энергия активации релаксации процесса  $E_p$  для стали 12X18H10T при температуре 1170 К равна 30 ккал/моль. Время релаксации  $t_p$  равно  $30 \cdot 10^{-6}$  с. Зададимся значением времени взаимодействия  $t_b = 2,5 \cdot t_p$  и временем активации  $t_a = 2,5 \cdot t_p$  [49].

Для определения необходимой скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}$

используем соотношение (20) [27]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{L_0 \cdot b}{1,5 \cdot t_p \cdot S_0} \quad (20)$$

где  $L_0$  – средний путь движения дислокаций до препятствия;  $b$  – модуль вектора Бюргерса;  $t_p$  - время релаксации;  $S_0$  – площадь активного центра.

Относительная деформация  $\epsilon = t_b \cdot \dot{\epsilon}$  составит значение 0,2. Необходимый удельный импульс магнитного давления для обеспечения требуемой деформации определяем из экспериментально полученных данных. В данном случае он составляет:  $12 \cdot 10^3 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ .

Параметры процесса, при которых получены качественные соединения пар: сплавов МН40А + Pt, стали 12Х18Н10Т + AlВа, Молибден МЧВП + PtВа, сплав НВ7 + PtВа приведены в таблице 17.

Таблица 17

Параметры процесса получения вторично-эмиссионных катодов методом  
МИСВ

№ п/п	Свариваемые элементы	$T^\circ, \text{K}$	$t_p \cdot 10^{-6} \text{с}$	$U_0 \cdot 10^3 \text{В}$	$W, \text{кДж}$	$P_m, 10^7 \text{н/м}^2$	$J_m, 10^3 \text{н/м}^2$	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$	$t_a \cdot 10^{-6} \text{с}$	$t_b \cdot 10^{-6} \text{с}$
1	Керн - сплав МН40А, $d=12 \text{ мм}$ Эмиттер - Pt, толщина 0,1 мм	970	10	2,8	6	10,2	8	3,1	55	58

2	Керн - ст. 12X18H10T, d=12 мм; Эмиттер - AlBa, толщина 0,2 мм	970	25	3,4	8,67	12,0	12,0	2,8	50	58
3	Керн - молибден МЧВП, d=17 мм; Эмиттер - PtBa, толщина 0,1·10 <sup>-3</sup> мм	1170	30	3,7	10,26	14,22	16,0	3,2	60	65
4	Керн-сплав НВ7, d=18 мм Эмиттер - Pt Ba, толщина 0,15 мм	1270	60	4,2	13,23	18,33	22	3,0	60	60

Качество сварки катодных узлов оценивалось по шлифам и на отрыв. В соединениях, полученных по расчётным режимам, неповаренных мест не обнаружено. Микроструктура зоны соединения катодных пар молибдена МЧВП + PtBa, сплав НВ7 + PtBa приведены на рисунке 48.

Соединения прошли термоиспытания многократным разогревом в вакууме до температуры 1273 К. Вспучивания облицовки (эмиттера) не обнаружено. Кроме того, соединения прошли специальные термоиспытания электронной бомбардировкой. В случае некачественного соединения эмиттер в месте неповара оплавлялся, происходил межэлектродный пробой [23].

Для определения работоспособности платино-бариевый катод с керном из молибдена, подвергался испытаниям в ЭВП на стенде динамических испытаний



в соответствии с существующей технологией и испытания на долговечность. Качество сварки соответствует требованиям, предъявляемым к приборам.

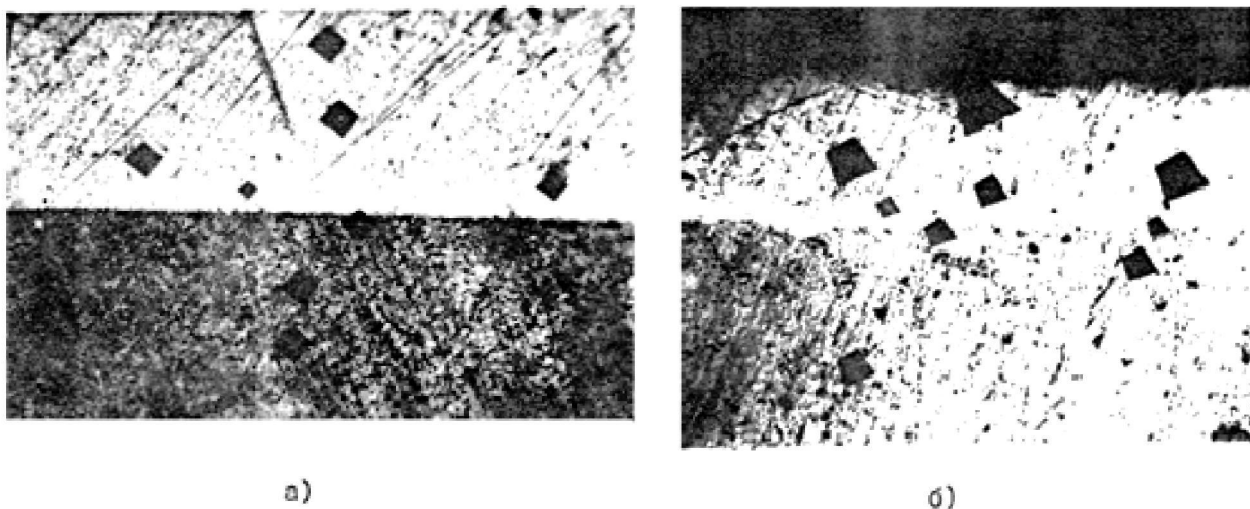


Рис. 48. Микроструктура зоны соединения

а) молибден МЧВП + Р  $t \times 300$ ; б) сплав HV7 + PtBa  $\times 200$

На рисунке 49 приведён свариваемый узел и элементы оснастки МИСВ молибденового катода с платино-бариевым эмиттером.

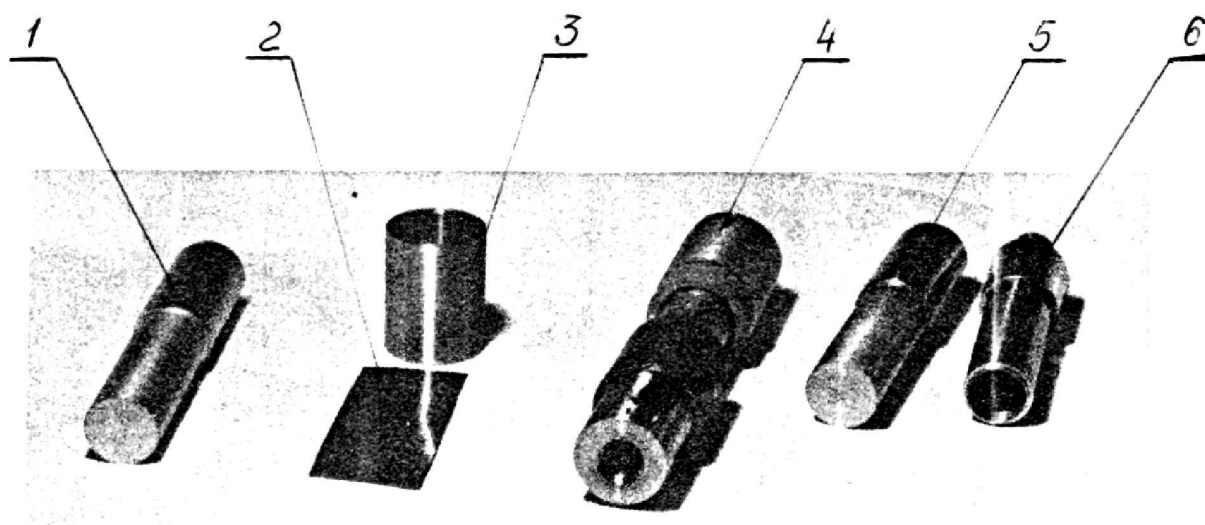


Рис. 49. Свариваемый катодный узел и элементы оснастки

1 - керн катода с закрепленным эмиттером; 2 - эмиттер; 3 - "спутник" ("спутник" покрыт никелем для предотвращения испарения меди при разогреве в вакууме); 4 - узел, собранный в цанговый зажим; 5 - заготовка керна катода с эмиттером после сварки; 6 - катод после механической доработки перед монтажом в прибор.

### 3.6. Исследование и разработка технологии прессования – сварки композиционных порошковых покрытий

Устройства магнитно-импульсной обработки в вакууме можно успешно использовать для комбинированного процесса прессования и приварки эмиссионных порошковых композиций к кернам катодов [51]. Схема магнитно-импульсного прессования в вакууме приведена на рис. 50.

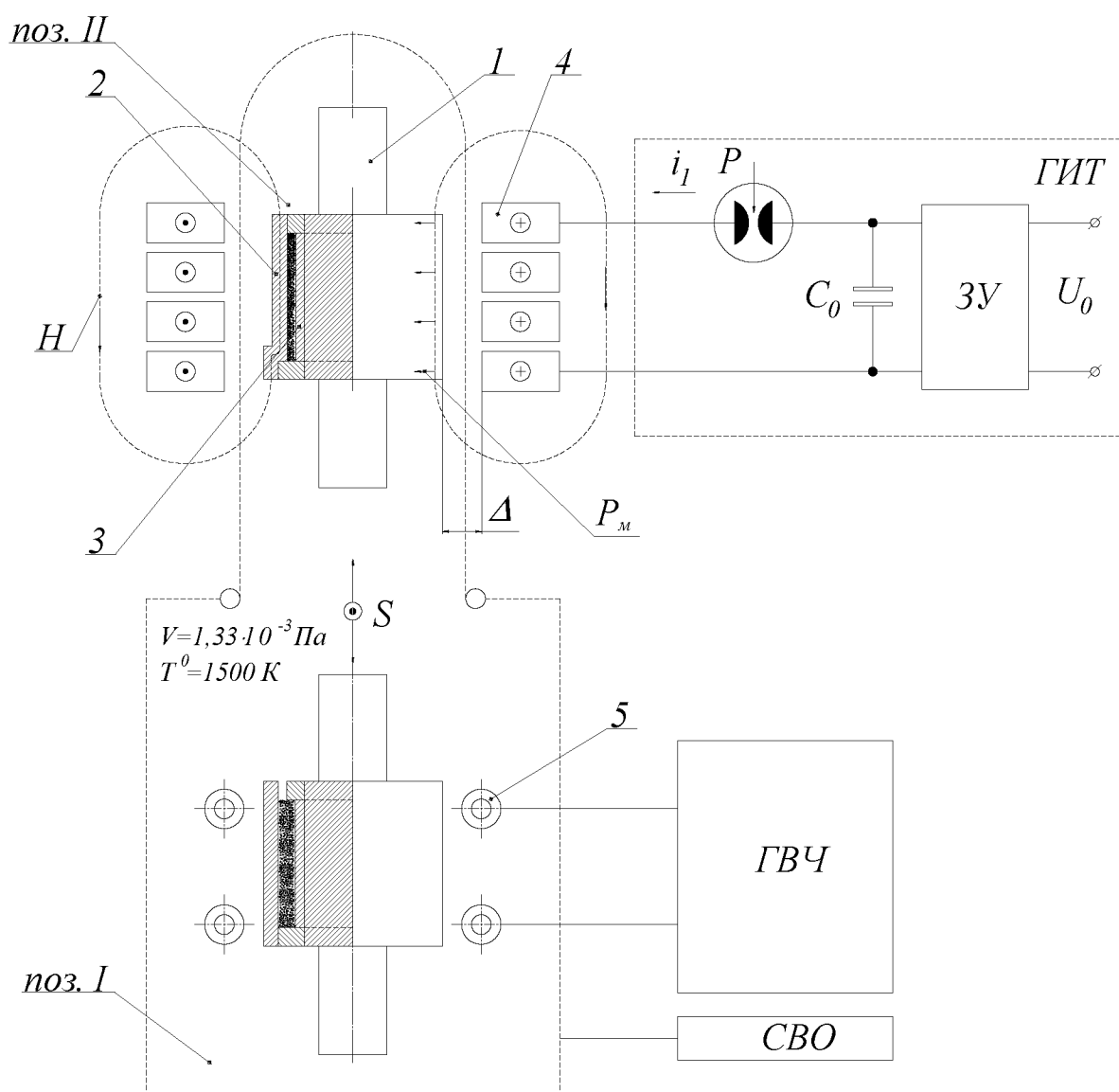


Рис. 50. Схема магнитно-импульсного прессования в вакууме

1 – основание (кern); 2 – оболочка (спутник); 3 – порошковое покрытие; 4 – индуктор МИОМ; 5 – индуктор ТВЧ; U<sub>0</sub> - напряжение сети; ЗУ - зарядное

устройство;  $C_0$  – ёмкость накопителя МИУ;  $P$  – коммутирующее устройство;  $i_1$  – разрядный ток;  $P_M$  – магнитное давление;  $H$  – магнитный поток; ГИТ – генератор импульсных токов; СВО – средства вакуумной откачки;  $V$  – вакуум;  $T$  – температура разогрева детали;  $\Delta$  – зазор между индуктором и оболочкой; поз. I – предварительный разогрев в вакууме; поз. II – магнитно-импульсная сварка (прессование) в вакууме;  $S$  – перемещение заготовки.

Технология магнитно-импульсного прессования (МИП) позволяет объединить операции обезгаживания, уплотнения порошковых материалов, спекания частиц порошка и сварки с керном катода в одну технологическую операцию, протекающей в вакуумной камере без промежуточных технологических переходов, и исключить операцию последующего спекания. Это значительно (в 2-3 раза) снижает трудоёмкость изготовления и составляет 1 н/ч [11].

Радиальная схема прессования при МИП позволяет в 1,5 раза экономить основной эмиссионный материал из порошковой композиции и повысить коэффициент использования материала (КИМ) с 0,3 до 0,8, а также снизить требования к механической обработке поверхности керна перед прессованием [51].

Для ускорения техпроцесса МИП рекомендуется перед загрузкой в вакуумную камеру шихту и керны предварительно обезгаживать при температуре 1073 К (800°C) 15-30 мин в водороде (или высоком вакууме  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па). Многочисленные эксперименты показали, что при получении покрытия из порошковых разнородных металлов с ограниченной растворимостью и с разницей температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в 1,5-2 раза необходимо на поверхность керна наносить промежуточный подслой (толщиной 10-15 мкм) из порошковой композиции, состоящей из материала керна и материала матрицы порошковой композиции с соотношением 1:1 [51]. Параметры режимов прессования катодных узлов приведены в таблице 18.

Технология МИП прошла проверку в производстве катодных узлов

электровакуумных приборов. Проведены испытания на термоциклирование, металлографические исследования зоны соединения покрытия опытной партии, которые показали, что свойства покрытия и качество сцепления с поверхностью керна соответствует требованиям ТУ.

Разработан отраслевой руководящий документ [47], который представляет собой обобщение результатов исследований процессов вакуумно-термической магнитно-импульсной обработки (ВТМИО).

Таблица 18

Параметры режимов МИП

Элементы катодного узла	Т, К	В, Па	W, кДж	J, кА	P <sub>М</sub> , МПа	V <sub>П</sub> , м/с	t <sub>В</sub>	t <sub>а</sub>	t <sub>р</sub>
				f <sub>р</sub> , кГц					
Керн - медь (Моб) d <sub>к</sub> =57 мм; ℓ/h=30	973	1,33·10 <sup>-1</sup>	11,0	197,8	250	34	90	40	10
				5					
Керн - молибден (МчВП) d <sub>к</sub> =11 мм; ℓ/h=40	1453	6,66·10 <sup>-3</sup>	19,8	370	380	40	60	25	5
				8,6					
Керн - монель d <sub>к</sub> =17 мм; ℓ/h=40 Эмиттер -	1423	6,66·10 <sup>-3</sup>	13,5	210	270	52	50	30	5
				7,5					

Деформирование оболочки NB $l/\delta=40$ $d_k=24$ мм;	1053	$1,33 \cdot 10^{-1}$	10,0	307,5	340	200	20	-	-
				25					

## **Глава 4. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом (УКС с МИП)**

### **4.1. Проблема получения сварных соединений типа "корпусная деталь – стержень"**

При изготовлении и монтаже изделий в машиностроении, строительстве, металлургии автомобилестроении часто приходится сталкиваться с необходимостью выполнять сварные соединения типа "корпусная деталь – стержень".

В качестве крепёжных стержневых элементов применяют различные виды метизов: болты, шпильки диаметром от 4,0 до 25 мм, которые изготавливают из черных и цветных металлов и их сплавов холодной высадкой на прессовом оборудовании или точением на токарном оборудовании. Корпусные детали изготавливают из листового проката толщиной от 0,5 до 5 мм [81].

Технология присоединения крепёжных деталей к основной части конструкции представляет собой достаточно сложный процесс, связанный с необходимостью приварки промежуточных элементов с последующим сверлением отверстий и нарезании резьбы под крепёжные стержневые элементы.

Типичные представители металлоконструкций стержневых элементов с корпусными деталями приведены на рисунке 51.

Проанализировав известные традиционные способы приварки крепёжных стержневых элементов к плоской основе, выяснилось, что они не лишены недостатков.

Использование дуговых способов сварки не позволяет приварить стержневой элемент к тонколистовой основе из-за возможности его прожога, подгорания резьбы, неперпендикулярности. Необходимо применять защитные газы или флюсовые кольца для защиты сварочной ванны от внешней среды.

Использование контактной сварки, диффузионной сварки в вакууме требует сложной оснастки, предварительных операций по созданию вакуумной среды, снижая при этом производительность.

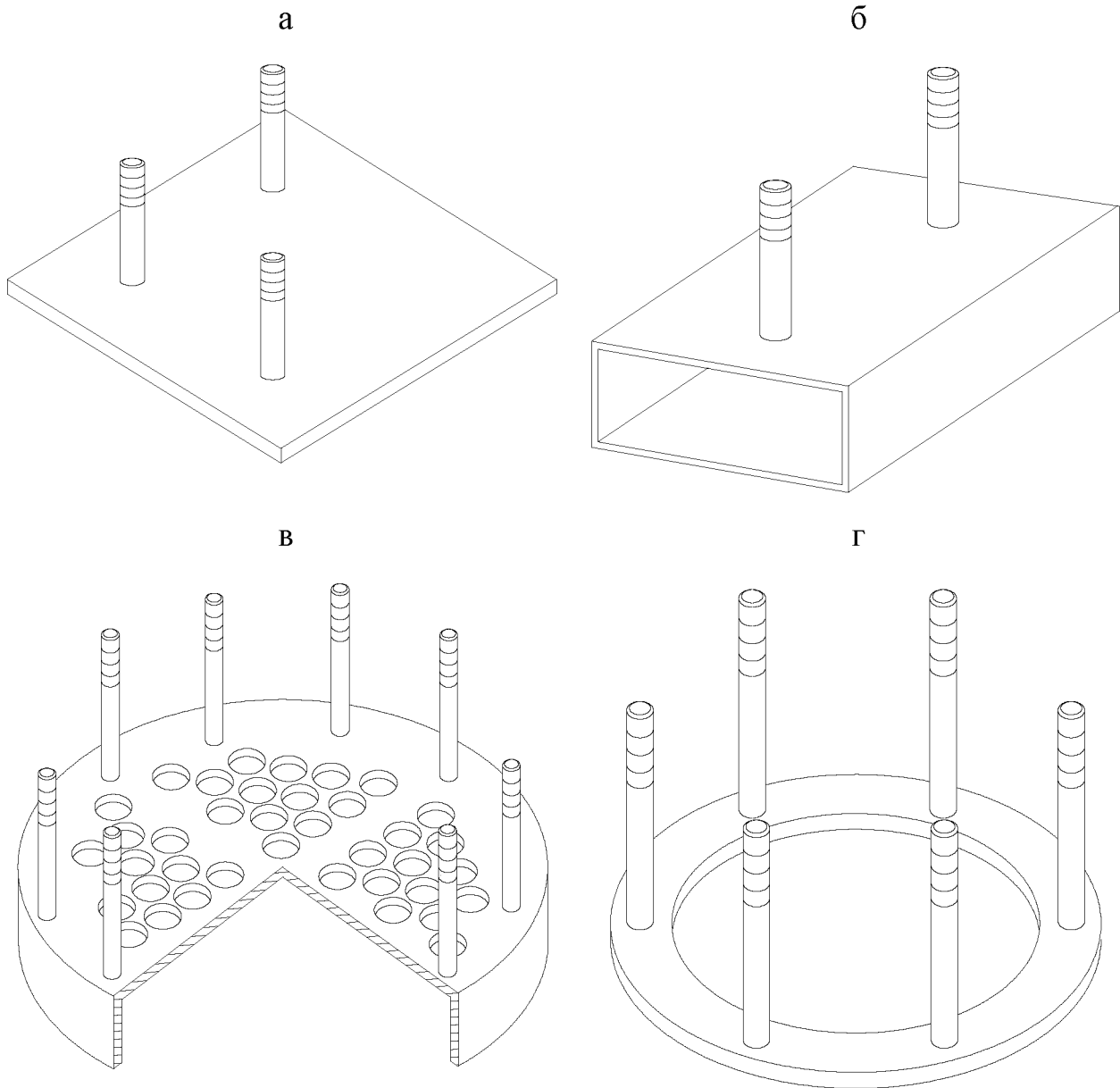


Рис. 51. Конструктивные виды сварных соединений типа "стержень - корпусная деталь"

а – крепежная панель; б – воздуховод с элементами крепления; в – крышка фильтра с направляющими крепежными элементами; г – фланец с крепежными элементами

Комбинированный способ содержит дополнительные операции при изготовлении. Сначала фланец приваривают круговым швом к отверстию горловины, нарезают резьбу в отверстиях, вворачивают шпильки, которые фиксируются сварным швом или каким - либо герметиком. На горловину надевают крышку, отверстия которой совпадают с местами установки шпилек.

В европейских странах наиболее широко известна технология присоединения стержневых крепежных деталей «CD Stud Welding» фирмы "Köco/Koster". Сварка осуществляется импульсной дугой с использованием пистолетов, оснащенных гидравлической системой подъема и опускания шпильки. Скорость нагружения также невелика и требуется использование защитной среды сварочной ванны с помощью флюсовых колец или защитных газов. Сварное соединение получается в жидкой фазе, поэтому не всегда возможно приварить массивный стержневой элемент к тонколистовой основе и сохранить при этом исходную структуру свариваемого материала.

В России и странах СНГ в радиоэлектронике для получения миниатюрных соединений типа " корпусная деталь - стержень" применяют ударную конденсаторную сварку с пружинным приводом. Она имеет большие преимущества перед предыдущими способами, но наличие специального пружинного механизма для создания ударного воздействия, не позволяет осуществлять сварку метизов диаметром более 2 мм, что ограничивают её применение при изготовлении крупногабаритных сварных соединений.

Все перечисленные способы получения сварных соединений типа "корпусная деталь - стержень" имеют дополнительные операции, громосткое оборудование, сложную оснастку, а следовательно требуют высоких затрат при организации производства. Снизить трудоёмкость и повысить качество стержневых крепежных элементов к корпусной основе позволит использование импульсных методов сварки с запасанием энергии в батарее конденсаторов.

Сварные соединения типа "корпусная деталь - стержень" целесообразно изготавливать без дополнительных операций, с одной установки.

Необходимость сборки металлических изделий с использованием



крепежных элементов является актуальной задачей и требует разработки экономически целесообразной технологии и оборудования для их получения. Всем этим требованиям удовлетворяет ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом (УКС с МИП).

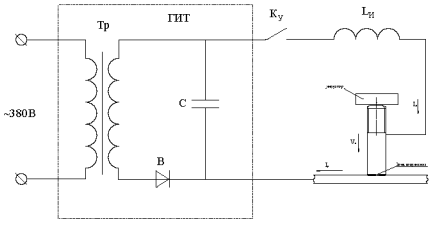
Основные способы получения соединений типа " стержень - корпусная деталь" приведены в таблице 19.

Таблица 19

Способы получения сварных соединений типа " корпусная деталь – стержень"

Способы получения	Преимущества	Недостатки
1. Сварной. Приварка крепежного элемента (например, шпильки) ручной дуговой, сваркой в среде защитных газов.	Простота изготовления	Прожоги, разновысотность шпилек, несоблюдение перпендикулярности по отношению к основе, возможность подгорания резьбы, большие затраты ручного труда.
2. Использование контактных способов (рельефная, диффузионная в вакууме) сварки.	Стабильность режимов сварки	Сложная оснастка, громосткое оборудование, создание вакуумной среды.
3. Комбинированный. Приварка фланца к отверстию горловины круговым швом, сверление и нарезание резьбы, вворачивание шпильки, фиксируемой сварным швом или герметиком.	Простота изготовления	Большая трудоёмкость получения соединений низкое качество сварных соединений; возможность "подгорания" резьбы, низкая производительность.

		
<p>4. Европейская технология «CD Stud Welding» (Германия, фирма "Köco/Koster").</p> 	<p>Высокая производительность.</p>	<p>Наличие устройства для подъёма и опускания шпильки, не обеспечивающих ковочного усилия; дополнительная операция, состоящая в удалении керамического кольца; получение сварного соединения в жидкой фазе, что нежелательно при сварке цветных металлов и их сплавов.</p>
<p>5. Ударная конденсаторная сварка с пружинным приводом.</p> 	<p>Отсутствие операций сверления, нарезания резьбы; малое время процесса сварки, что позволяет соединять разнородные металлы (сталь–алюминий, сталь–латунь).</p>	<p>Наличие специального пружинного механизма для создания ковочного воздействия, приварка метизов диаметром до 2мм.</p>
<p>6. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-</p>	<p>Создание ковочного усилия; совместная</p>	<p><b>Необходимы исследования?!</b></p>

<p>импульсным приводом.</p> 	<p>высокоскоростная деформация и получение сварного соединения в твердой фазе; нет необходимости в защите сварочной ванны от окружающей среды.</p>	
---	--	--

#### 4.2. Принцип метода ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом (УКС с МИП).

На кафедре "Машины и автоматизация сварочного производства" в ДГТУ предложили использовать энергию импульсных магнитных полей, для реализации ковочного усилия.

Для получения сварных соединений типа "корпусная деталь–стержень" целесообразно использование ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом (УКС с МИП). Однако данный высокопроизводительный процесс мало изучен и требует анализа особенностей получения сварных соединений при разряде батареи конденсаторов на свариваемые детали.

На устройство для ударной конденсаторной сварки стержневых деталей с плоским основанием получен патент РФ № 2007130908/22 [82].

Процесс сварки осуществляется в атмосфере без применения защитных сред с выплеском из зоны сварки тонкого слоя окисных пленок, адсорбированных газов и неметаллических включений.

Принципиальная возможность получения качественных соединений данным методом была экспериментально осуществлена на переналаживаемой лабораторной установке описанной в литературе [34].

Принципиальная электрическая схема ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом приведена на рис. 52.

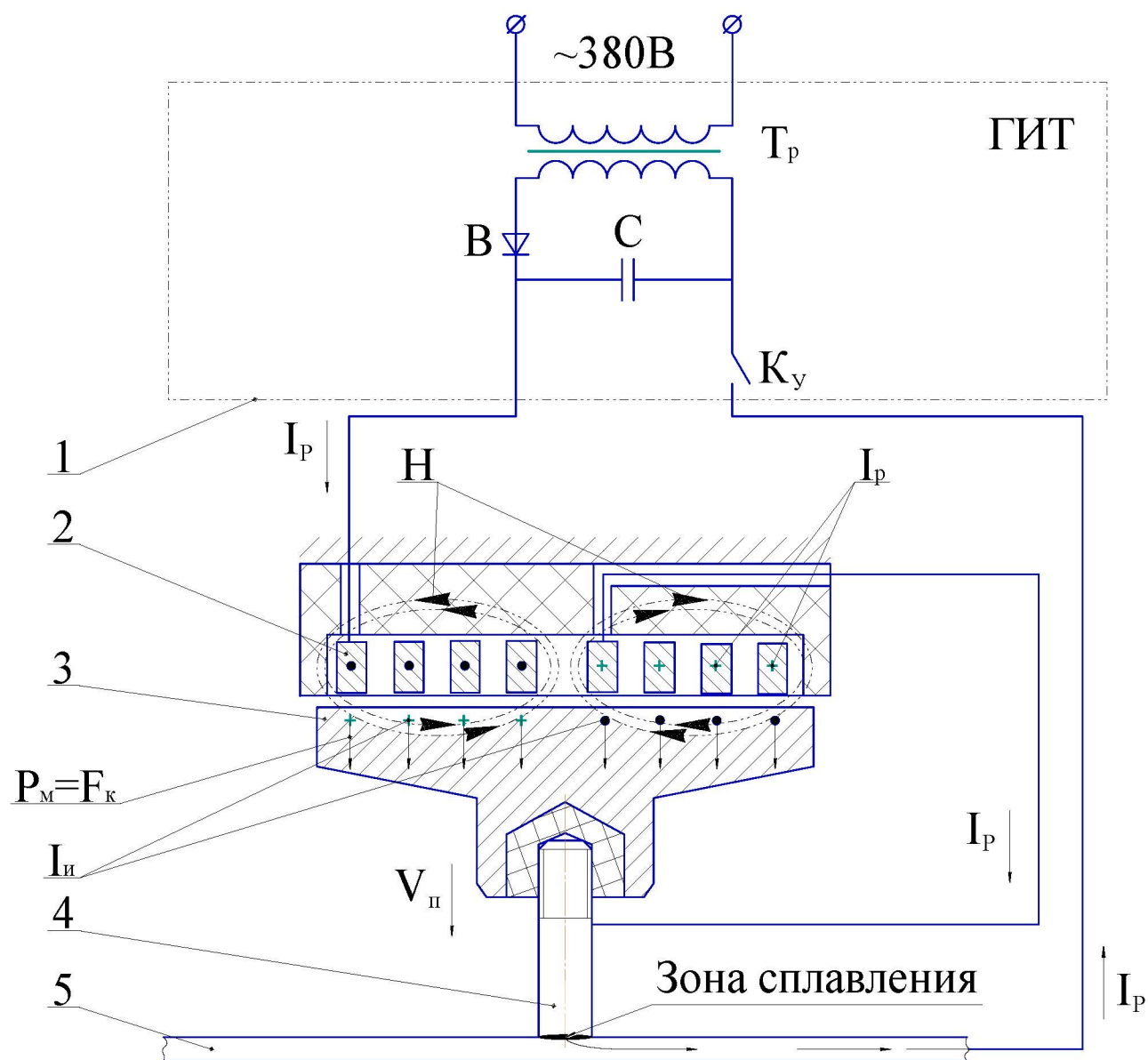


Рис. 52. Принципиальная схема УКС с МИП

1 - ГИТ (генератор импульсных токов):  $T_p$  – трансформатор,  $V$  – выпрямитель,  $C$  – батарея конденсаторов,  $K_y$  – коммутирующее устройство; 2 - плоский индуктор; 3 - толкатель; 4 - стержневая деталь; 5 - плоская деталь;  $H$  – магнитный поток,  $F_k$  - ковочное усилие,  $P_M$  – магнитное давление,  $I_{и}$  – ток индуцированный,  $I_p$  – ток разряда.

Сущность процесса заключается в следующем. Стержневую деталь 4 с выступом приводят в контакт с плоской деталью 5 и включают последовательно в цепь с плоским индуктором 2 и генератором импульсных токов (ГИТ) 1, что позволяет синхронизировать процесс протекания тока и силового воздействия в зоне соединения.

В процессе разряда батареи конденсаторов С по виткам индуктора 2 и стержневой детали 4 протекает импульс тока  $I_p$ , переменный магнитный поток  $H$  которого обуславливает возникновение индуцированных токов  $I_{и}$  в толкателе 3. В тоже время, взаимодействие магнитного поля  $H$  индуктора 2 с током  $I_{и}$  в толкателе 3 приводит к возникновению магнитного давления  $P_m$ , которое воздействует на толкатель прижимающий стержневую деталь к корпусной [84].

Протекающий в зоне соединения деталей импульс тока оплавляет контактные поверхности, пары расплавленного металла создают естественную защиту сварочной ванны от внешней среды. Ковочное усилие, передаваемое стержневой деталью позволяет осуществить выплеск из зоны сплавления тонкого слоя жидкого металла вместе с загрязнениями (окисными и адсорбированных пленками, неметаллическими включениями). Очищенные поверхности совместно деформируются, осуществляется сварка в твердой фазе [27].

Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями изготовления сварных соединений типа " корпусная деталь - стержень": реализуется электроэрозионная очистка соединяемых поверхностей; за счёт интенсивной деформации сопрягаемых элементов осуществляется твердофазное взаимодействие без образования интерметаллидных включений, что очень существенно при сварке разнородных металлов и их сплавов. Силовое нагружение реализуется за счет взаимодействия магнитного поля индуктора с током в толкателе, что упрощает конструкцию устройства для перемещения и осадки.

Технологические достоинства УКС с МИП связаны с высокой

точностью дозирования энергии в конденсаторах, с кратковременностью воздействия  $50 \div 200$  мкс) и возможностью осуществлять одновременно силовое и тепловое воздействие.

### 4.3. Параметры, влияющие на качество сварного соединения

Установлено [83], что при ударной конденсаторной сварке на качество сварного соединения влияют следующие энергетические параметры: рабочее напряжение  $U_p$ ; ёмкость накопительного блока  $C$ ; индуктивность рабочего инструмента  $L$ , определяемая числом витков индуктора  $N$ . Эти параметры процесса и оборудования полностью определяют энергию  $W$  и длительность воздействия на свариваемые детали  $t_{св}$ .

Кроме того, на качество соединения влияют следующие геометрические параметры сборки: диаметр выступа –  $d_v$  и длина выступа –  $l_v$ , зависящие от диаметра стержня  $D_{ст}$ .

В ходе проведения постановочных экспериментов было выявлено, что наличие выступа на торце шпильки облегчает процесс образования сварного соединения, при этом, накопленная энергия ниже, по сравнению с приваркой стержней с гладким торцом [83].

Полученные зависимости прочности сварного соединения от энергии разряда, ёмкости накопительного блока, индуктивности рабочего инструмента, определяемой числом витков индуктора, представлены на рис. 53, 54.

Влияние геометрических размеров выступа представлено на рис. 55. Сварку образцов производили из сплава Л63. Диаметр выступа составлял 1,3, 1,4 и 1,5 мм. Длину выступа изменяли от 0,8 до 2,5 мм, напряжение заряда батареи конденсаторов  $U=2000$  В, ёмкость накопительного блока  $C=2400$  мкФ, число витков индуктора  $N=7$  вт.

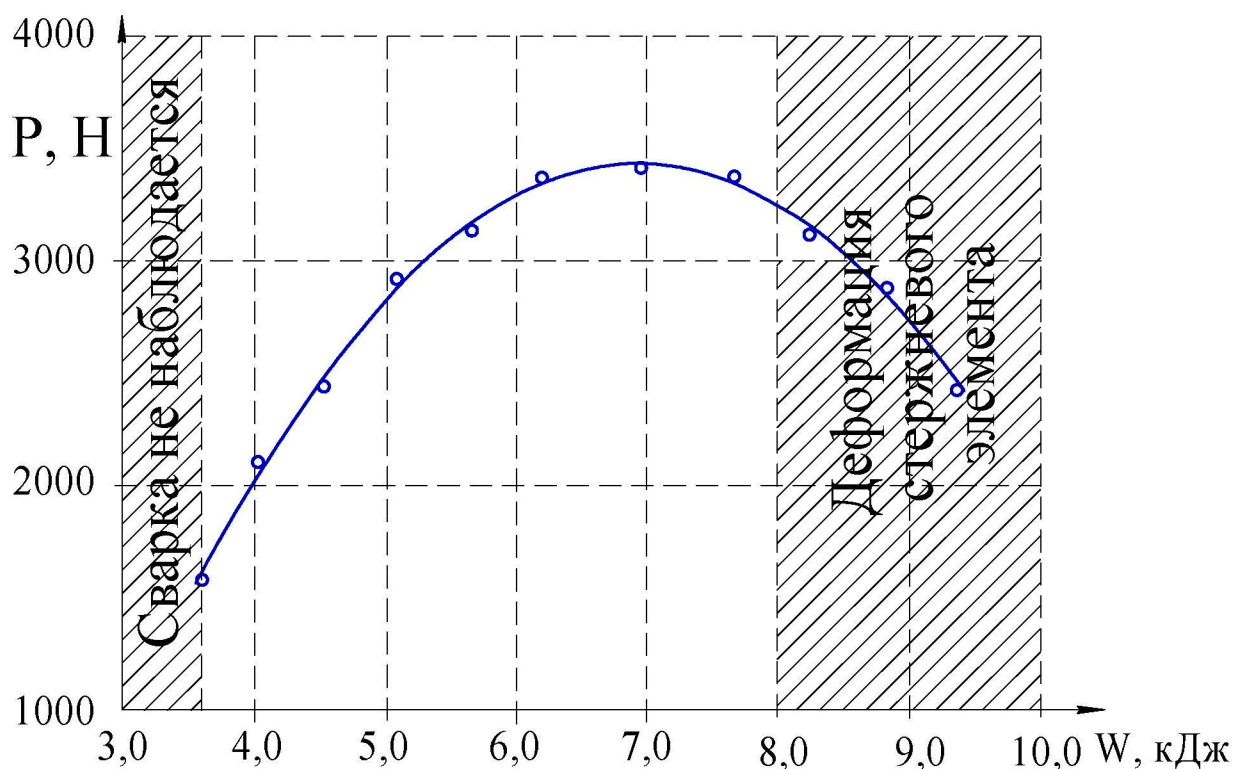


Рис. 53 Зависимость усилия на отрыв от энергии разряда

$C=2400\text{мкФ}$ ,  $N=7$ ,  $D_{\text{СТ}}=10\text{мм}$ ,  $\delta_{\text{П}}=0,8\text{мм}$ ,  $d_{\text{В}}/l_{\text{В}}=1,3/1,5\text{мм}$ , сварные соединения из сплава Л63

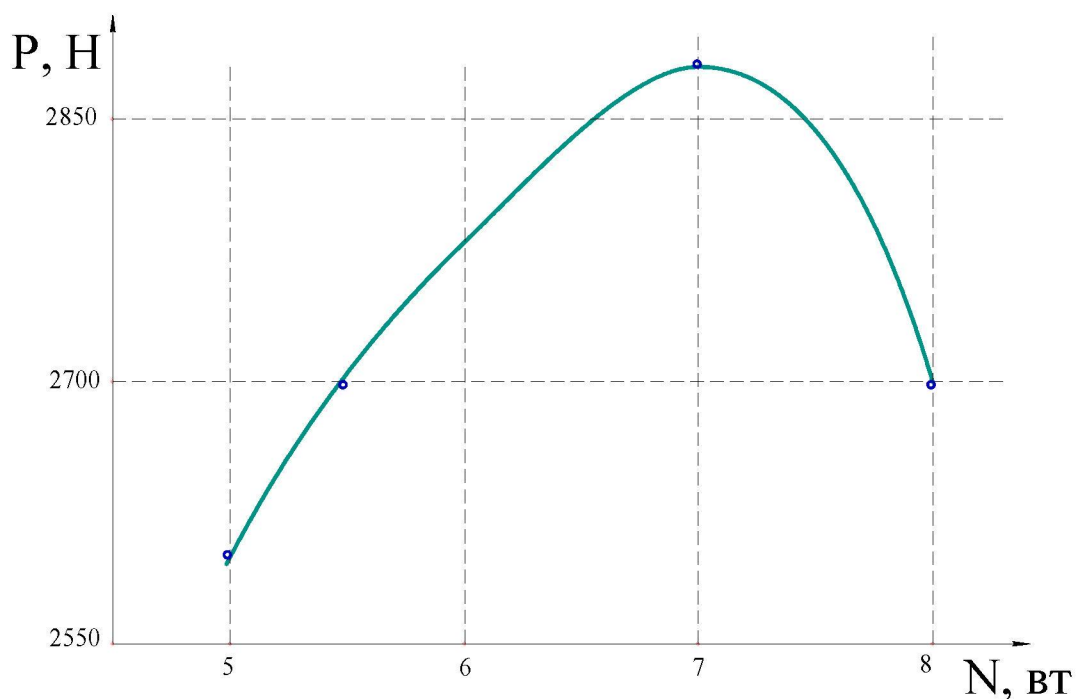


Рис. 54 Зависимость усилия на отрыв от числа витков индуктора

$U=2000\text{В}$ ,  $C=2000\text{мкФ}$ ,  $D_{\text{СТ}}=10\text{мм}$ ,  $\delta_{\text{П}}=0,8\text{мм}$ ,  $d_{\text{В}}/l_{\text{В}}=1,3/1,5\text{мм}$ , сварные соединения из сплава Л63

При длине выступа менее 1,0мм не успевает оплавиться вся поверхность выступа и торца стержневого элемента, с увеличением длины выступа – более 2,0мм наблюдается неполное его оплавление, испарение и прочность сварного соединения снижается.

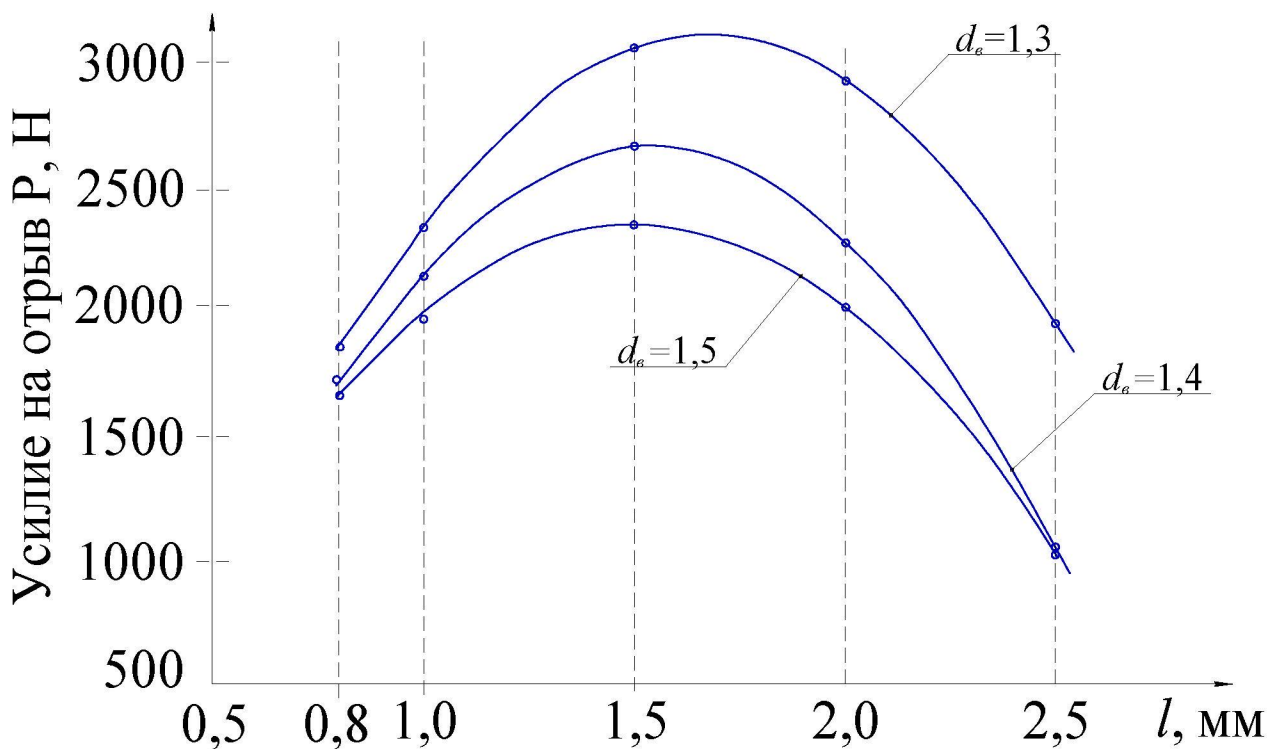


Рис. 55 Зависимость усилия на разрыв от длины выступа стержневого элемента

Полученные результаты измерений разрядного контура переналаживаемой экспериментальной установки в зависимости от параметров режима сварки и прочностные характеристики сварных соединений из сплава Л63 представлены в таблице 20.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены области определения и эффективного варьирования основных энергетических параметров процесса УКС. Для различных экспериментальных образцов они имеют следующие значения:

- напряжение заряда  $U = 2 \div 3$  кВ;
- емкость накопительного блока батарей конденсаторов



$$C = 1800 \div 2400 \text{ мкФ};$$

– число витков индуктора  $N = 6 \div 8$ .

Таблица 20

Параметры режимов сварки, результаты измерений разрядного контура и прочностные характеристики сварных соединений из сплава Л63

Ёмкость накопительного блока батареи конденсаторов $C$ , мкФ	Напряжение заряда $U$ , кВ	Число витков индуктора $N$ , шт	Энергия $W$ , кДж	Частота разряда тока $f$ , кГц	Максимальное значение тока $I_{\text{МАХ}}$ , кА	Усилие отрыва $P$ , Н
1800	2,0	7	3,6	3,0	60,1	1600
2100	2,0	7	4,2	2,77	73	2500
2400	2,0	6	4,8	2,3	69,5	2740
2400	2,0	7	4,8	2,59	78	3100
2400	2,0	8	4,8	2,86	86,3	2250
2400	2,5	7	7,5	2,59	97,5	4060
2400	2,8	7	9,4	2,59	109,2	3600

Диаметр выступа / длина выступа,  $d_6/l_6$  при всех экспериментах  $d_6/l_6 = 1,3/1,5$  мм, диаметр стержневого элемента,  $D_{ст} = 10$  мм, толщина плоского листа,  $\delta = 0,8$  мм, индуктивность разрядного контура установки  $L = 152$  нГн

Экспериментальные образцы сварных соединений, полученных ударной конденсаторной сваркой с магнитно-импульсным приводом представлены на рис. 56.



АМг6+АМг6



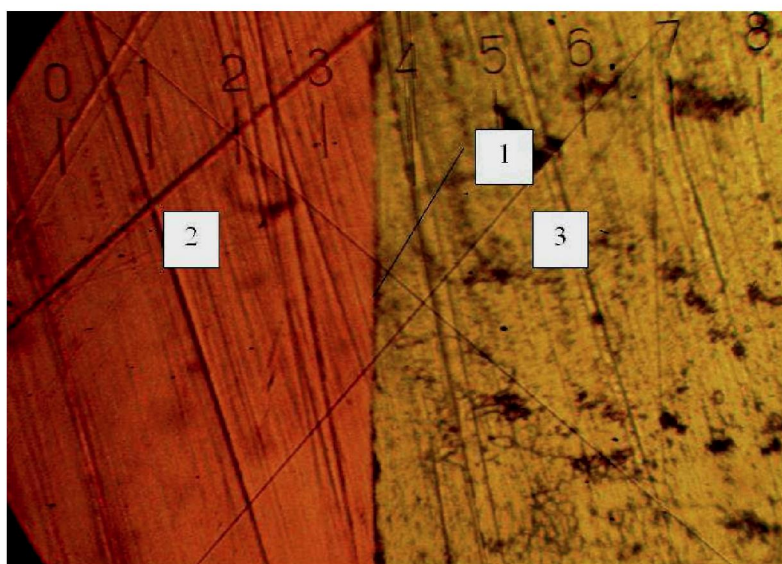
Л63+Л63



Л63+М1

Рис. 56. Сварные соединения, полученные УКС с МИП

Металлографическим анализом установлено, что зона соединения представляет собой четкую границу, характерную для сварки материалов в твердой фазе импульсными методами. Качество высокое, в зоне сплавления отсутствуют поры, трещины, интерметаллидные включения. Микроструктура зоны сварного соединения медного сплава М1 со сплавом Л63 представлена на рис. 57.



М1+ Л63х478

Рис. 57. Микроструктура зоны сварного соединения медного сплава М1 со сплавом Л63. 1–зона соединения; 2,3–основной металл.

#### 4.4. Разработка экспериментального оборудования и опытной технологии

Экспериментальные исследования процесса ударной конденсаторной сварки производили на переналаживаемой магнитно–импульсной установке, описанной в литературе [34]. Данное оборудование позволяло варьировать напряжение заряда батарей конденсаторов от 100 до 6000В, емкость накопительного блока батарей конденсаторов от 150 до 2400 мкФ.

Для проведения исследований были спроектированы и изготовлены инструмент (плоские индуктора с толкателями).

Корпус индуктора выполнен из стеклотекстолита, диаметр индуктора 200мм. Общий вид плоских индукторов с толкателем представлен на рис. 58.

Конический толкатель был изготовлен из дюралюминия со стальной вставкой в центре.

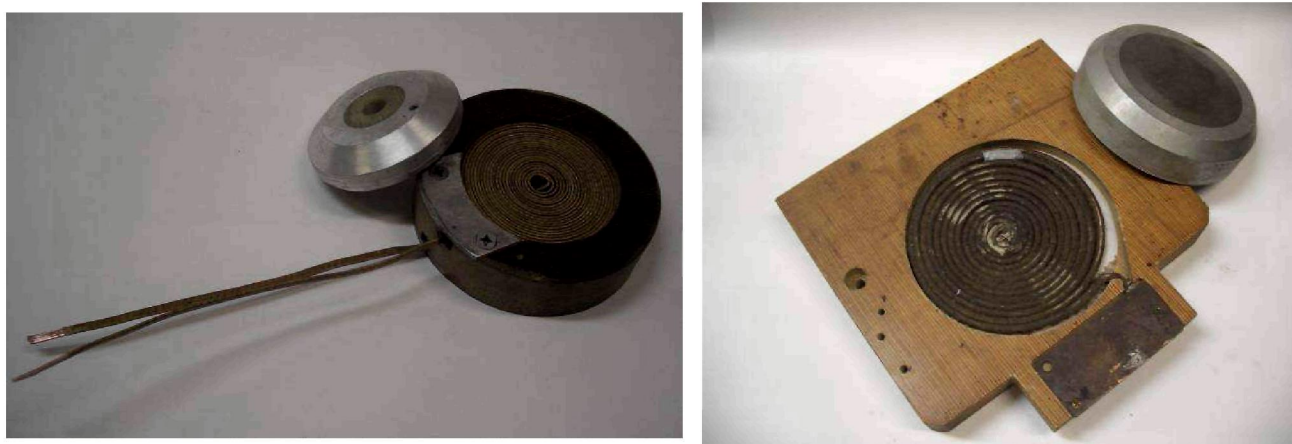


Рис. 58. Общий вид плоских индукторов с толкателем для УКС

Оснастка (рис. 58) представляет собой ручной пресс, который должен иметь достаточную прочность и жесткость при силовом воздействии толкателя на свариваемые детали.

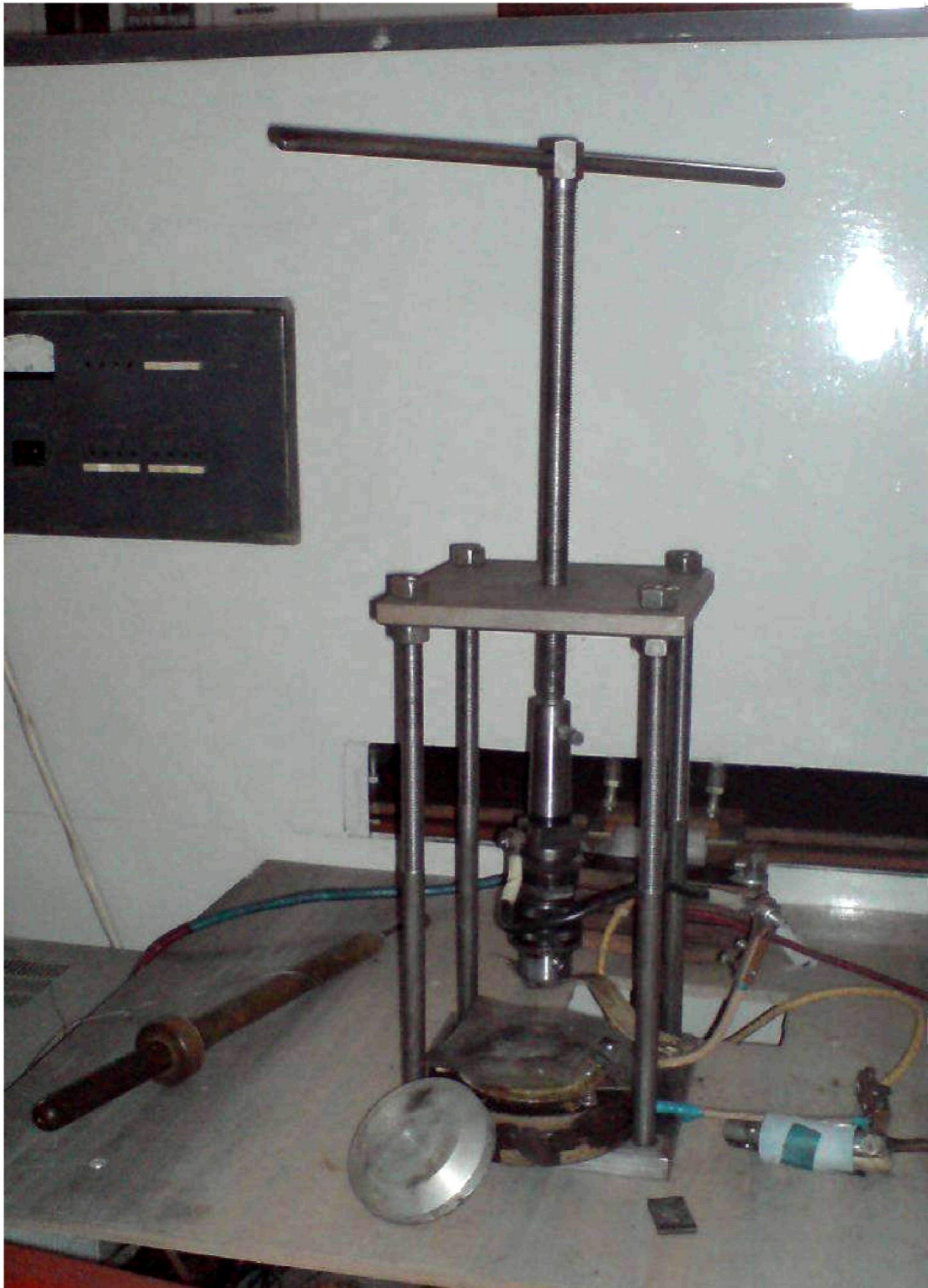


Рис. 59. Общий вид экспериментальной оснастки

Для регистрации измерений параметров разрядного контура были разработаны специальные средства измерения. Блок схема экспериментальной переналаживаемой установки со средствами измерения представлена на рис. 60.

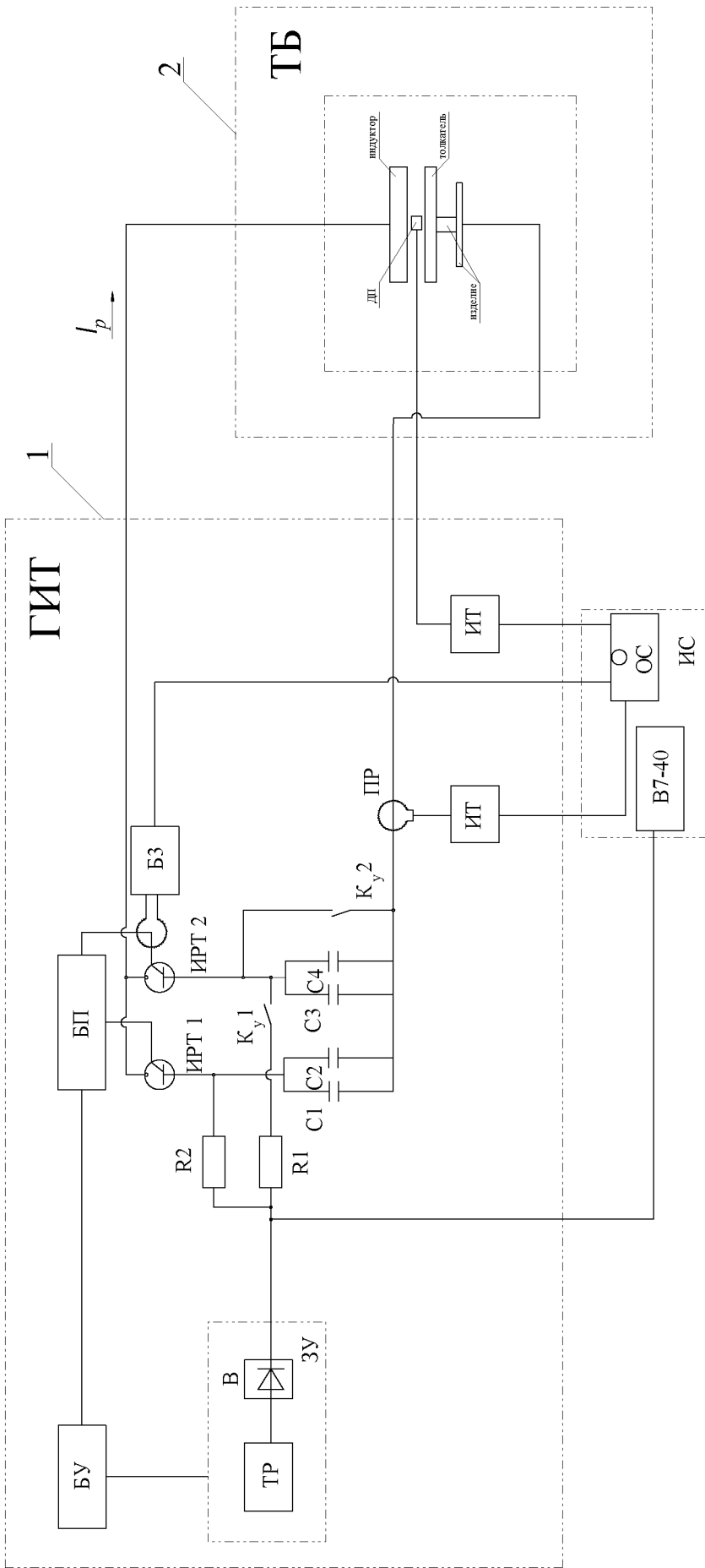


Рис. 60 Блок схема экспериментальной переналаживаемой установки со средствами измерения  
 1 - ГИТ-генератор импульсных токов; 2 - ТБ - технологический блок; БУ-блок управления;  
 ЗУ-зарядное устройство; БП-блок поджига; БЗ-блок запуска; ДП-датчик поля; ПР-пояс Роговского;  
 ИС-измерительный стенд; ОС-осциллограф С8-14; В7-40-вольтметр; Ку1, Ку2- высоковольтный  
 коммутатор; С1-С2, С3-С4-импульсные конденсаторы (ИК6-150, ИК25-12); ИРТ1, ИРТ2-игнитронные  
 разрядники ИРТ-6; R1, R2-зарядные сопротивления;

Общий вид экспериментальной установки с инструментом и оснасткой представлен на рис. 61.

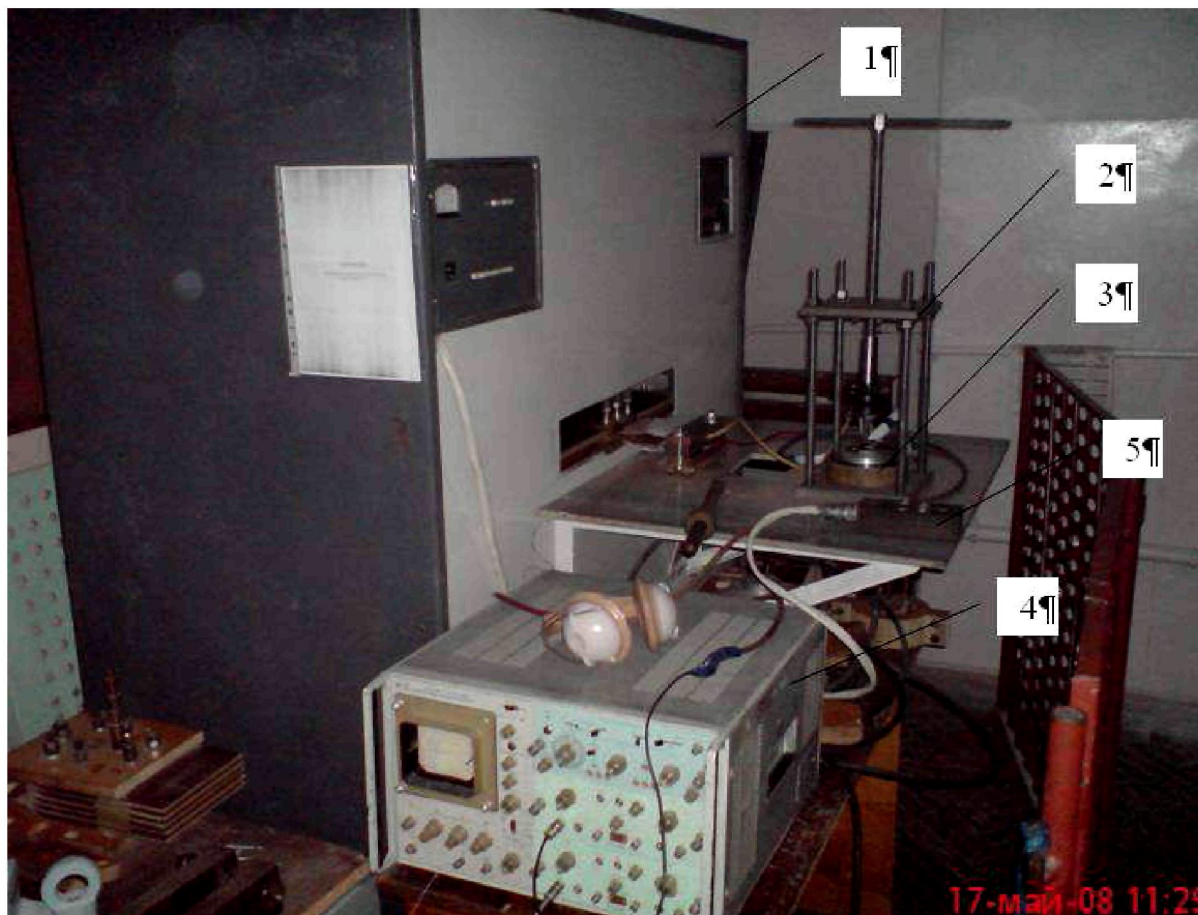


Рис. 61. Экспериментальная установка с инструментом и оснасткой  
1 – переналаживаемая магнитно - импульсная установка; 2 – оснастка (ручной пресс); 3 – инструмент (индуктор с толкателем); 4 – двухлучевой запоминающий осциллограф С8 – 14; 5 – пульт управления.

Проведенные эксперименты позволили разработать опытную технологию изготовления фланца с элементами крепления (рис. 51, г) с использованием УКС с МИП. Фланец используется для крепления крышки резервуара для хранения кислот и щелочей. Материал фланца и элементов крепления ЛБ3 ГОСТ 2060-06.

Основные требования к изготовлению: перпендикулярность крепежных элементов по отношению к фланцу.

Маршрутная схема изготовления фланца представлена на (рис. 62):

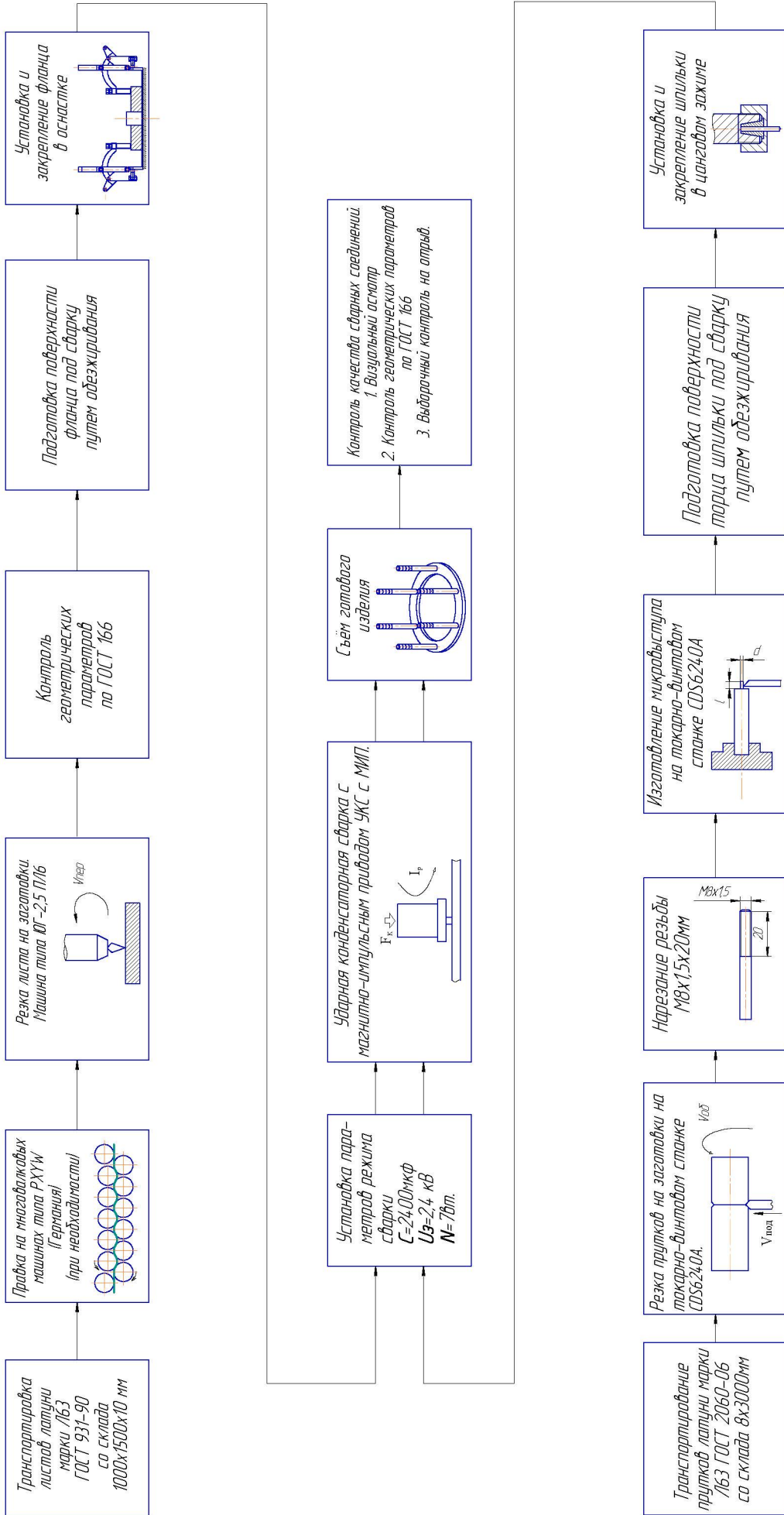


Рис. 62. Технологический процесс изготовления фланца

Таким образом, предложен и исследован принципиально новый способ импульсной сварки с использованием магнитного давления в качестве ковочного усилия [84]. Способ позволяет осуществлять разогрев и интенсивную деформацию соединяемых поверхностей. Осуществление сварки на супержестких режимах (сварочный ток  $50\div 100$  кА, время сварки  $50\div 200$  мкс) позволяет соединять стержневые детали с корпусными из разнородных материалов.





## Глава 5. Проектные изыскания и разработка промышленного спецтехнологического оборудования

### 5.1. Выбор и расчет параметров технологии и оборудования магнитно-импульсной сварки

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования принципиально новых видов магнитно-импульсной сварки с использованием индуцированных токов и магнитного давления и проектные изыскания элементов генераторов импульсов тока позволили приступить к разработке инженерных методов выбора характеристик оборудования, инструмента и параметров импульсного воздействия [85].

В данной работе приводится методика выбора и расчета параметров магнитно-импульсной сварки-формовки [86].

Методика включает четыре взаимосвязанных этапа. Блок схема алгоритма расчета параметров техпроцесса и оборудования приведена на рисунке 62.

На первом этапе - устанавливается ряд величин и зависимостей, необходимых для последующих расчётов. К ним относятся: электрофизические характеристики свариваемого материала и материала инструмента-индуктора и оснастки; данные предварительных экспериментов; геометрические размеры и технические требования к тонкостенным трубчатым деталям.

Для осуществления расчётов на первом этапе должны быть представлены следующие величины:  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – удельные электропроводности свариваемого материала, материала индуктора и оснастки (матрицы),  $\rho$  – удельное сопротивление обрабатываемого материала;  $E_p$  – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию напряжений (самодиффузии по границам зёрен);  $l, d$  – длина и диаметр индуктора,  $\epsilon$  – относительная деформация,  $\delta$  – исходный зазор,  $W_{св} (min)$  – минимальная энергия для сварки,  $W_{св} (max)$  – максимальная энергия для сварки.

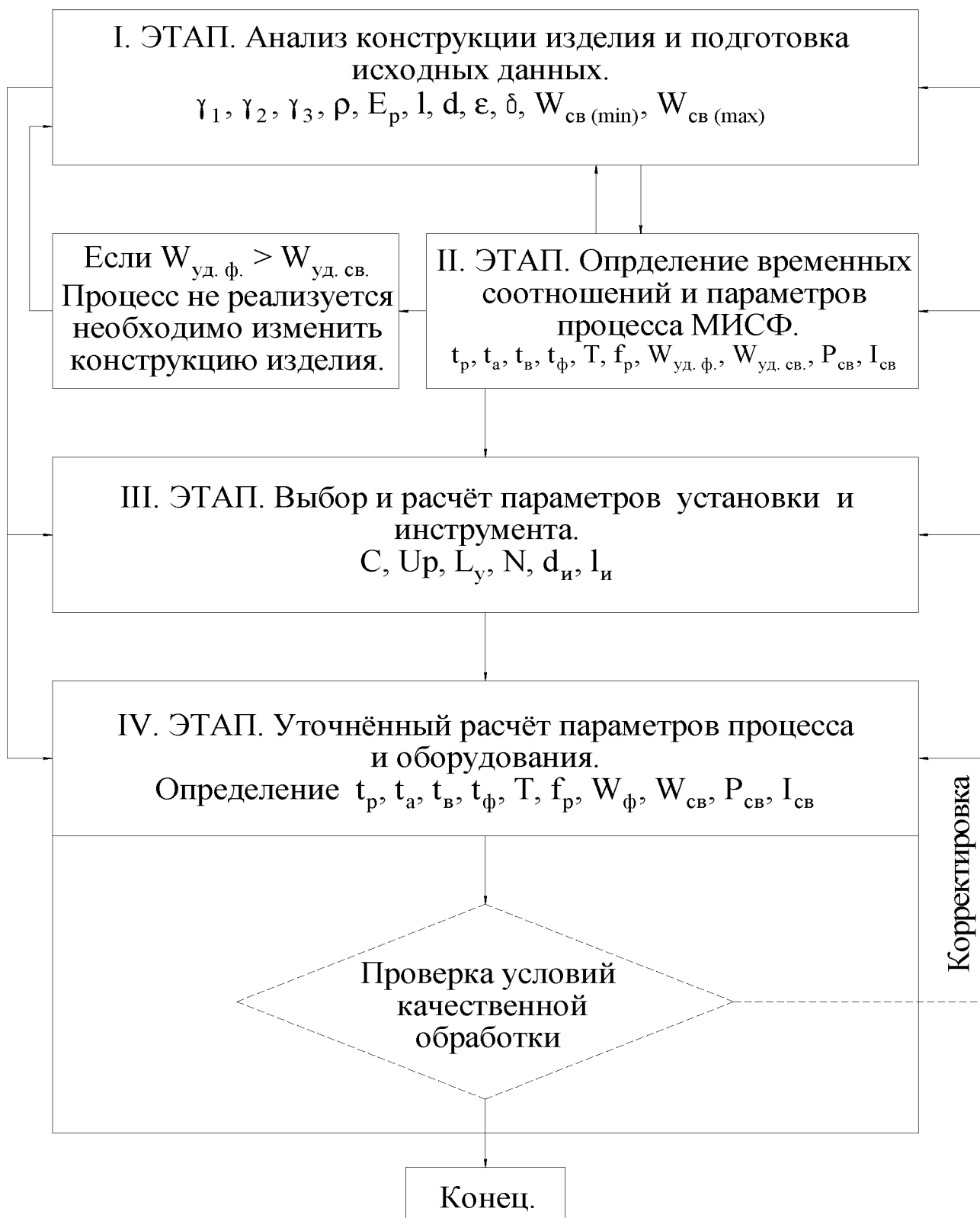


Рис. 62. Блок схема расчёта и выбора параметров

На втором этапе - определяется временные соотношения, и параметры процесса – определяется удельная энергия  $W_{уд. ф.}$ , необходимая для

формообразования и сравнивается с удельной энергией  $W$  уд. св., необходимой для реализации сварочного процесса, в зависимости от результата сопоставления принимается решение – реализовывать предварительную формовку или осуществлять совмещённый процесс МИСФ.

Осуществляются оценочные расчёты и выбор времени релаксации напряжений в сварном соединении  $t_p$ , времени деформационной активации  $t_a$ , времени твёрдофазного взаимодействия – сварки  $t_{св}$ , времени формообразования  $t_f$ .

Для оценки времени активации  $t_a$  в процессе твёрдофазного взаимодействия необходимо иметь эмпирические зависимости деформации материала  $\epsilon$  в зоне контакта от энергии импульса  $W$ .

Выбирается собственная и рабочая частота разряда тока. Зная энергию проведения совмещённого процесса, определяем сварочное магнитное давление  $P_m$  и сварочный ток  $I_{св}$ . Этому предшествует определение рабочей частоты  $f_p$  и энергии разряда  $W$ .

На третьем этапе - осуществляется выбор и расчёт характеристик элементов разрядного контура, рабочего инструмента и оснастки. Выбирается ёмкость накопителя  $C$ , рабочее напряжение  $U_p$ , индуктивность установки  $L_y$ , число витков индуктора  $N$ , диаметр индуктора  $d_{и}$ , длина индуктора  $l_{и}$ .

Проведенные выкладки носят оценочный характер и могут быть использованы для выбора требуемого класса оборудования при организации или переоснащении производственных участков, разработке технических требований и технических заданий на проектирование спецтехнологических разрядно-импульсных установок.

Уточнённый расчёт параметров разрядно-импульсных процессов и процессов, сварки и формообразования, определение временных соотношений, энергии и периода разряда осуществляется на четвёртом этапе.

Проверяется выполнимость условий качественной обработки [68]. В случае невыполнения этих соотношений ведётся корректировка расчётов.

Индукцированный (сварочный) ток  $I_{и}$  рассчитывается, исходя из того что

заготовка является коротко-замкнутым витком воздушного трансформатора, где первичная обмотка рабочий инструмент-индуктор [10].

Параметры оборудования выбираются в обеспечение требуемого магнитного давления  $P_m$  [68].

Собственная индуктивность установки для обеспечения максимального магнитного значения воздействия должна по рекомендациям [1] удовлетворять неравенству:

$$L_y < L_{и-з}. \quad (21)$$

Ширину индуктора  $l_{и}$  из соображений обеспечения равномерного давления в зоне соединения берем равной [45]:

$$l_{и} = (1,1-1,2) \cdot l_{з.с.}. \quad (22)$$

Число витков индуктора выбираем по рекомендациям [1]:

$$N = \sqrt{\frac{L_y}{L_1}}, \quad (23)$$

где  $L_1$  – индуктивность приходящая на один виток.

Емкость накопителя  $C$  выражается из соображений обеспечения необходимой длительности взаимодействия:

$$C \geq \frac{16\pi^2 \cdot (t_B + t_n)}{I_{\sigma}}. \quad (24)$$

Данная методика апробирована при разработке технологии и оборудования получения магнитно-импульсным методом тонкостенных трубчатых деталей.

## **5.2. Исследования параметров разрядного контура генератора импульсов тока**

Для экспериментальной проверки правомерного использования выбранной методики расчета процесса МИС необходимо произвести измерения разрядного тока установки и напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора. Эти величины, в конечном счёте, определяют сварочный ток и

давление на соединение.

Величина  $I(t)$  при разряде контура имеет вид единичного импульса и описывается довольно точно зависимостью:

$$I_p(t) = I_0 \cdot e^{-\alpha_3 t} \cdot \sin 2\pi \cdot f_p \cdot t, \quad (25)$$

где  $I_0$  – максимальное значение тока;  $\alpha_3$  – коэффициент затухания;  $f_p$  – частота разряда.

Практически диапазоны изменения  $f_p$  и  $I_0$  для процессов МИС составляют соответственно 1-150 кГц и  $10-600 \cdot 10^3$  А. Стандартных средств измерения токов, в данном диапазоне нет.

Наиболее удобным из существующих методов измерения тока для устройства МИС является метод, основанный на применении датчика, представляющего собой вторичную обмотку трансформатора относительно токоподводящей шины установки - "пояса Роговского" [12, 36].

Пояс Роговского (ПР) представляет собой торроидальную катушку, охватывающую проводник с измеряемым током. Плотность намотки ПР равна  $\frac{N_H}{l_H}$ , а площадь витка  $S_B$  постоянна по длине катушки ( $N_H$  – число витков,  $l_H$  – длина намотки).

Напряжение  $U_{\text{ПР}}$ , наводимое в ПР переменным током  $I(t)$ , выразится как:

$$U_{\text{ПР}} = \mu_0 \cdot \frac{N_H}{l_H} \cdot S_B \cdot \frac{dI(t)}{dt}. \quad (26)$$

Измерительная система, использующая ПР, должна включать в себя интегратор, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный  $I(t)$ . Методы тарировки ПР подробно описаны в работе [11].

Существует много методов измерения сильных магнитных полей. В их числе необходимо отметить, в первую очередь, способы, основанные на эффекте Холла, где изменение удельного сопротивления в магнитном поле, а также различные оптические методы. Однако для измерения сильных импульсных магнитных полей, как правило, применяют индуктивный метод, основанный на применении катушки связи, обладающий рядом достоинств,

таких, как простота в изготовлении и обращении, возможность измерения напряженности магнитного поля  $H(t)$  в большом диапазоне амплитуд и частот, хорошая локализация точки измерения [36, 45].

Если датчик магнитного поля, выполненный в виде цилиндрической катушки, поместить в однородное магнитное поле, направленное вдоль оси катушки, то наведенное при этом в катушке напряжение  $U_k$  выразится как:

$$U_k = \mu \cdot S \cdot \frac{d(H)t}{dt}, \quad (27)$$

где  $S$  – общая площадь витков катушки датчика.

Таким образом, величина  $U_k$  пропорциональна производной от  $H$  по времени и может быть использована для измерения напряженности поля.

Так же как и для ПР система измерения должна включать интегратор. Наиболее удобным является использование RC – цепочки. Для определения разрядного тока  $I(t)$  и напряженности магнитного поля  $H(t)$  в рабочем зазоре индукторов и основных параметров эквивалентной схемы разрядного контура установок МИС разработан измерительный стенд (ИС) [71].

В частности, ИС может быть использован для непосредственного исследования процессов МИС, испытаний, контроля и обнаружения неисправностей установок, а также решения задач оптимизационного характера. Принципиальная схема измерительного стенда изображена на рис. 63.

Разработанный ИС представляет собой полностью автономный комплекс измерительных и регистрирующих устройств, в состав которого входят:

- осциллограф универсальный запоминающий типа С8-14, используемый в качестве регистратора;
- устройство для измерения тока разрядного контура;
- устройство для измерения напряженности магнитного поля индуктора;
- механизм перемещения датчика магнитного поля;
- устройство внешнего запуска.

Сигналы поступают к регистратору по трем каналам:

- измерение тока разрядного контура  $I(t)$ ;
- измерение напряженности магнитного поля индуктора  $H(t)$ ;
- внешнего запуска ИС.

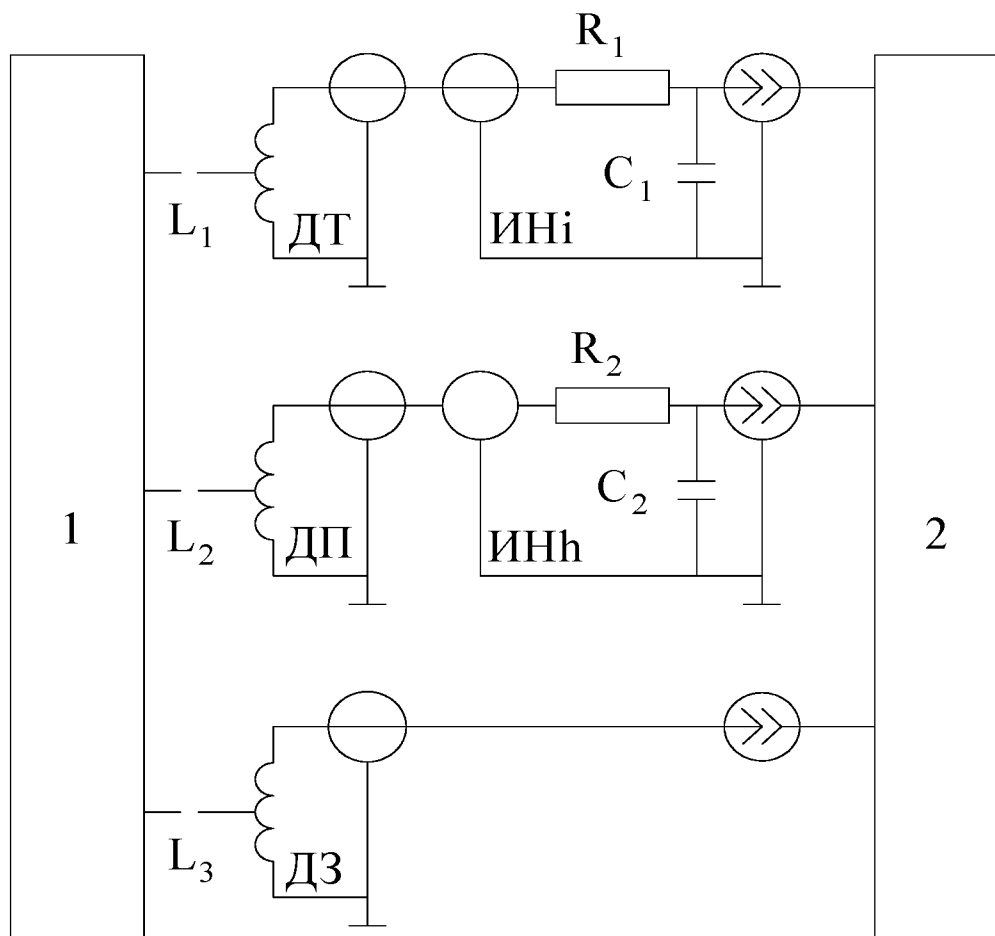


Рис. 63. Принципиальная схема измерительного стенда

1 – установка МИС; 2 – запоминающий осциллограф; ДТ – датчик тока; ДП – датчик поля; ДЗ – датчик внешнего запуска; ИН<sub>и</sub>, ИН<sub>h</sub> – интеграторы каналов измерения тока и напряженности магнитного поля.

Канал измерения  $I(t)$  включает в себя датчик тока ДТ в качестве которого использован ПР, охватывающий токоподводящую шину ГИТ и интегратор ИН.

Канал измерения  $H(t)$  состоит из датчика поля ДП фиксируемого в необходимой точке рабочего зазора индуктора и интегратора.

Для подачи запускающего импульса на вход осциллографа (ЭО) служит канал внешнего запуска (ВЗ) датчика запуска (ДЗ) который представляет собой дополнительную обмотку трансформатора системы поджига. В этом случае



сигнал  $I(t)$  или  $H(t)$  поступает на вход ЭО с некоторой задержкой ( $t_{\text{зап}} = 3-5$  мкс) относительно начала развертки, что позволяет полностью фиксировать передний фронт первой полуволны процесса. Измерительный стенд был использован при исследованиях параметров разрядного контура и характеристик индукторных систем в лабораторных условиях, а также в период опытной эксплуатации промышленной установки МИС [71].

Для удовлетворения ограничений накладываемых требованиями техпроцесса МИС по частотным и энергетическим характеристикам и с целью разработки рекомендаций по проектированию оборудования исследовались параметры разрядного контура.

Результаты измерений и расчетные параметры разрядного контура перенастраиваемой установки МИС сведены в таблицу 22.

Таблица 22

Результаты измерений и расчетные параметры разрядного контура перенастраиваемой установки МИС.

Ёмкость ЁНЭ С, мкФ	Тип конденсаторов	Максимальное напряжение $U_{\text{МАХ}}$ , кВ/ Энергия W, кДж	Максимальное значение тока $I_{\text{МАХ}}$ , кА			Индуктивность разрядного контура L, нГн	Частота разряда тока f, кГц		
			Расчётные значения	Результаты измерений	Отклонения %		Расчётные значения	Результаты измерений	Отклонения %
12	ИК 25-12	$\frac{15}{1,3}$	116	120	3,5	200	100	102	2
24	ИК 25-12	$\frac{15}{2,7}$	212	200	6	120	95	94	1,04

48	ИК 25-12	$\frac{15}{5,4}$	369	360	2,5	79	90	89	1,1
96	ИК 25-12	$\frac{15}{10,8}$	603	590	2,2	49	75	73	2,7
150	ИК 6- 150	$\frac{6}{2,7}$	173	180	4	180	30	31	3,3
300	ИК 6- 150	$\frac{6}{5,4}$	255	260	2	165	22	21	4,5
600	ИК 6- 150	$\frac{6}{10,8}$	402	380	5,5	133	20	19	5

### 5.3. Разработка многоканального промышленного оборудования

Специального оборудования МИС до настоящего времени не разрабатывалось. Для осуществления промышленного внедрения техпроцесса изготовления тонкостенных трубчатых деталей стала задача создания высокопроизводительного промышленного оборудования.

Критерием сравнительной оценки машин, используемых, для обработки одних и тех же изделий являются технико-экономические показатели, основной из которых – производительность оборудования. Созданная однопозиционная установка МИС [34, 58], как и любое неавтоматизированное оборудование, обеспечивало, в основном качество сварки и формовки. Цикловая производительность данной установки определяется выражением (18).

Данное устройство позволило решить первую задачу автоматизации производства тонкостенных трубчатых деталей – осуществить совмещённый процесс высокоскоростным методом. Производительность по сравнению с традиционным процессом течения возросла более чем в пять раз. Анализ технологической диаграммы процесса (рис. 23) позволяет найти пути дальнейшего повышения производительности, создания многопозиционной машины с использованием принципа совмещения вспомогательных переходов.

Для внедрения в производство был разработан многопозиционный полуавтомат последовательного действия. Цикловая производительность устройства  $G_{ц}$  с одним емкостным накопительным блоком, имеющем  $p$  каналов разряда (позиций) определяется выражением:

$$G_{ц} = \frac{p}{T_{ц}} = \frac{p}{[t_{з-в} + t_{и} + p \cdot (t_{зап} + t_{мио})]} \quad (28)$$

Требуемой производительности, обеспечивающей производственную программу, с учетом роста выпуска изделий, удовлетворяет разработанная трехканальная установка [21, 59, 64].

Данная установка предназначена для получения трубчатых деталей с использованием индуцированных токов и импульсного магнитного давления. Определение параметров установки и рабочего инструмента для сварки тонкостенных трубчатых деталей велось согласно III этапа методики выбора и расчета (раздел 5.1).

Анализ номенклатуры тонкостенных трубчатых деталей позволил определить энергетические и частотные характеристики оборудования. Основные технические характеристики оборудования приведены в таблице 23.

Таблица 23.

Основные технические характеристики многопостовой установки.

Наименование, обозначение	Значение	Примечания
Ёмкость накопителя $C$ , мкФ	12, 24, 48, 96, 150, 300, 600	Импульсные конденсаторы ИК-25-12, ИК-6-150
Рабочее напряжение $U_p$ , кВ	1-15	С интервалом 100 В
Собственная частота разряда тока $f$ , кГц	30-150	В зависимости от типа конденсатора
Число каналов	3	Три коммутатора
Число позиций	6	Последовательное действие
Производительность $G_{ц}$ , $\frac{\text{шт}}{\text{час}}$	20-40	В зависимости от типа изделия

На рисунке 64 изображена блок-схема установки МИСФ, состоящей из двух основных частей: трёхканального генератора импульсных токов (ГИТ) и технологического блока (ТБ). Циклограмма работы трёхканальной установки МИСФ приведена на рисунке 65.

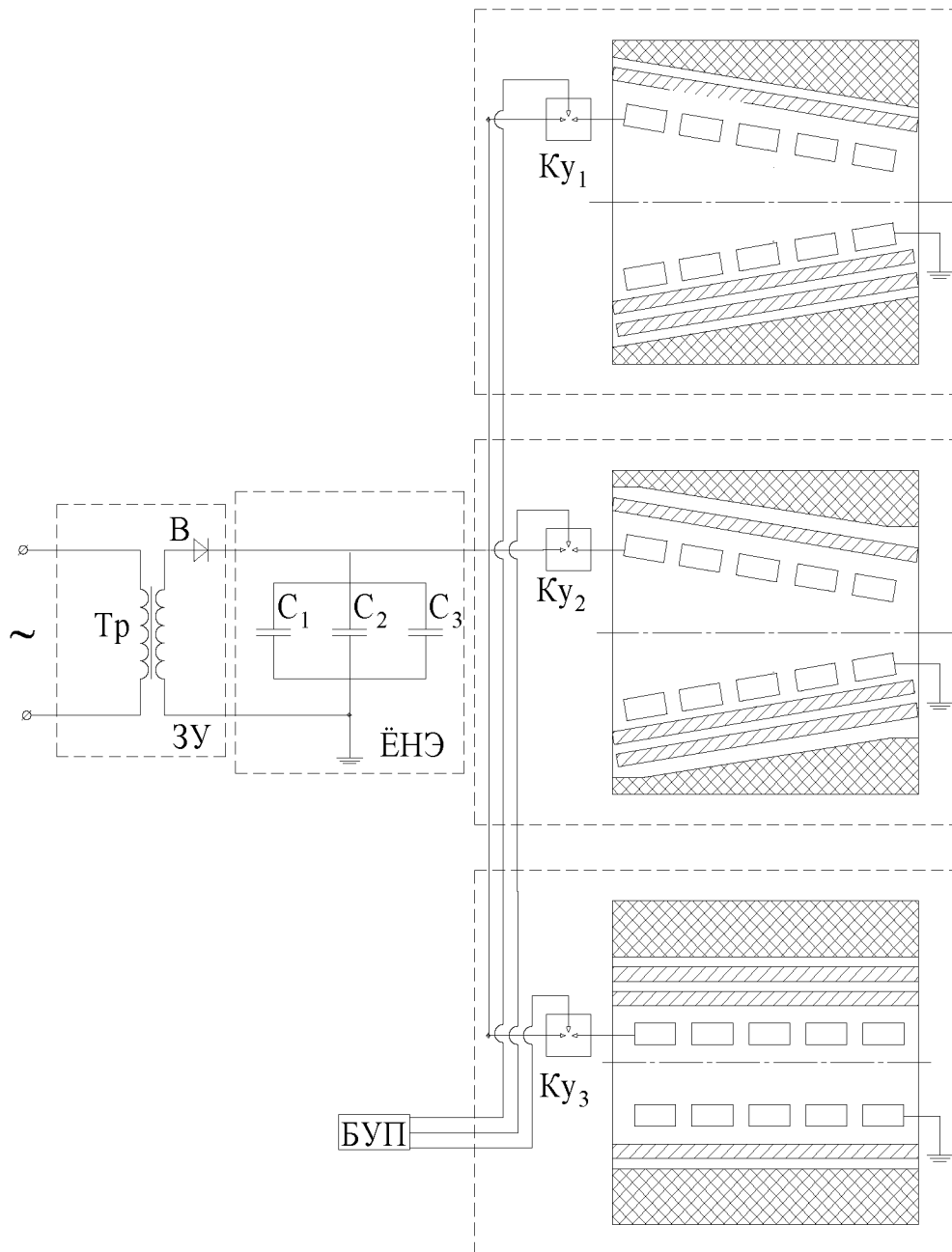


Рис. 64. Блок-схема установки МИСФ

Тр – высоковольтный трансформатор, В – выпрямитель, ЗУ – зарядное устройство,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – батарея высоковольтных конденсаторов, ЕНЭ – ёмкостной накопитель энергии,  $K_{y1}$ ,  $K_{y2}$ ,  $K_{y3}$  – коммутирующие устройства, БУП – трёхканальный блок управления поджигом.

ГИТ обеспечивает подачу на рабочий инструмент требуемое количество энергии, осуществляет автоматический заряд и разряд импульсных конденсаторов ёмкостного накопителя, защиту по высокому и низкому напряжению в случае аварийного режима, обеспечивает, при необходимости, выдачу заданного количества импульсов, индикацию и сигнализацию прохождения команд, ручной и автоматический режим работы.

Технологический блок состоит из многоместной камеры с загрузочным люком, системы приводов крепления инструмента и трех гнезд фиксации индукторов и оснастки. Свариваемые заготовки помещается в зазор между инструментом-индуктором и оснасткой – формирующей матрицей.



Рис. 65. Циклограмма работы трёхканальной магнитно-импульсной установки

В конструкции данной установки использован принцип последовательной обработки однотипных изделий от одного накопителя различными индукторами. Работа всех блоков установки в комплексе обеспечивает в полуавтоматическом режиме все необходимые переходы

магнитно-импульсной сварки трубчатых деталей. Производительность установки МИСФ рассчитывается по выражению (28) и в зависимости от конструктивного вида свариваемого узла колеблется в пределах (20 – 40) шт/час.

Блок-схема и конструкция установки МИСФ проверены на патентную чистоту. Результаты экспертизы: установка аналогов не имеет, обладает патентной чистотой в отношении стран США, Германии, Англии, Франции, Японии, Китая [21].

Данное оборудование позволяет после переналадки осуществлять сварку по плоскости и на обжим осуществлять разделительные и сборочные операции, формовку развитых поверхностей, пайку с использованием давления импульсных магнитных полей [3]. Общий вид установки приведен на рисунке 66.



Рис. 66. Общий вид установки

Внедрение в быстропереналаживаемое опытное производство кабельной продукции наземной и бортовой аппаратуры на ракетно-космическом заводе

ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева технологии и оборудования МИСФ позволило увеличить производительность изготовления тонкостенных трубчатых деталей и, что более важно, снизить вес узла заделки кабеля в штепсельный разъём [5, 35].

#### 5.4. Установка магнитно-импульсной сварки в вакууме

Данная установка предназначена для получения в твердой фазе охватывающих соединений с использованием в качестве сварочного давления энергии импульсных магнитных полей. Определение параметров установки и инструмента для сварки катодных узлов вторичной эмиссии, велось согласно рекомендациям работы [46]. Анализ номенклатуры конструктивных видов и свариваемых пар позволил определить энергетические и частотные характеристики оборудования. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 24.

Таблица 24

Основные технические характеристики установки МИСВ

Технические характеристики	Импульс-БМ
Энергоемкость, W кДж	32
Емкость накопителя С, Ф	$1800 \cdot 10^{-6}$
Собственная частота ГИТ, кГц	20
Индуктивность ГИТ, нГн	150
Активное сопротивление ГИТ, Ом	$7,8 \cdot 10^{-3}$
Вакуум В, Па	$1 \cdot 10^{-3}$
Температура разогрева $T^0$ , К	1400
Габариты обработанных узлов, $10^{-3}$ м	50; 100; 100
Число позиций, шт	8

На рисунке 67 изображена блок-схема установки магнитно-импульсной сварки в вакууме, состоящей из двух основных частей: генератора импульсов

тока (ГИТ) технологического блока (ТБ).

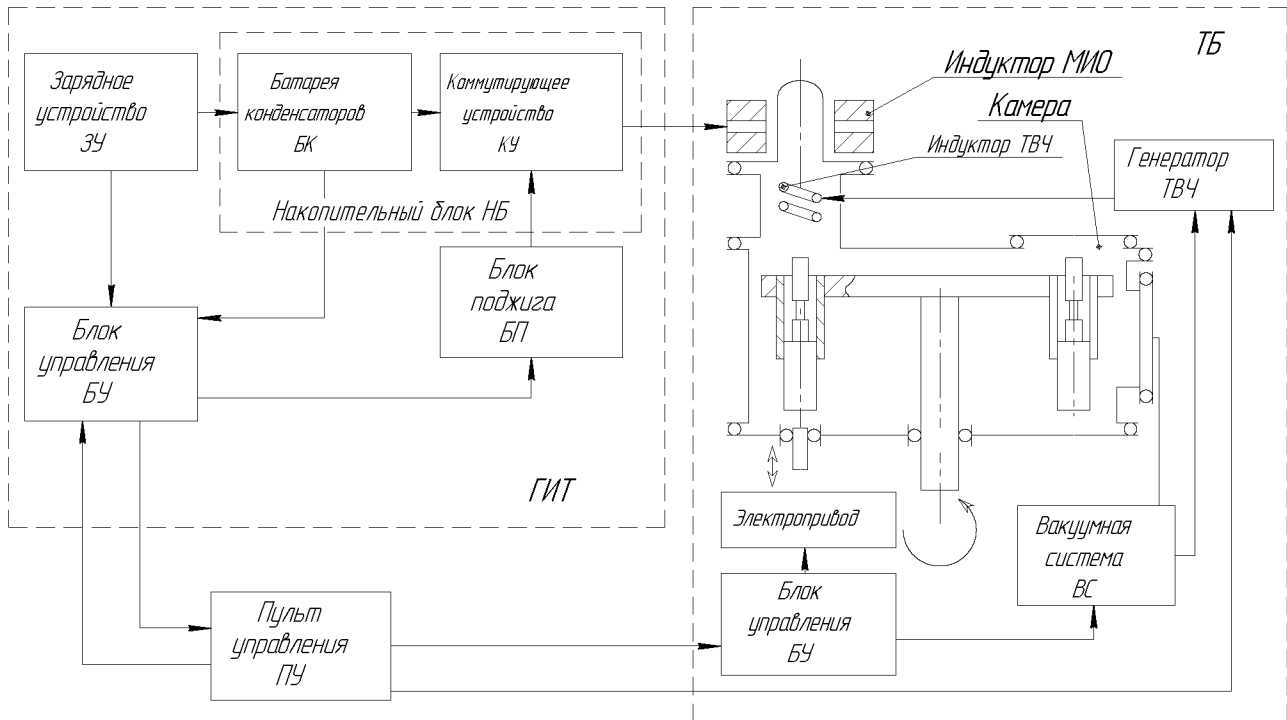


Рис. 67 - Блок схема установки магнитно-импульсной сварки в вакууме  
ГИТ - генератор импульсных токов; ТБ - технологический блок

На рисунке 68 представлена циклограмма работы установки МИСВ.

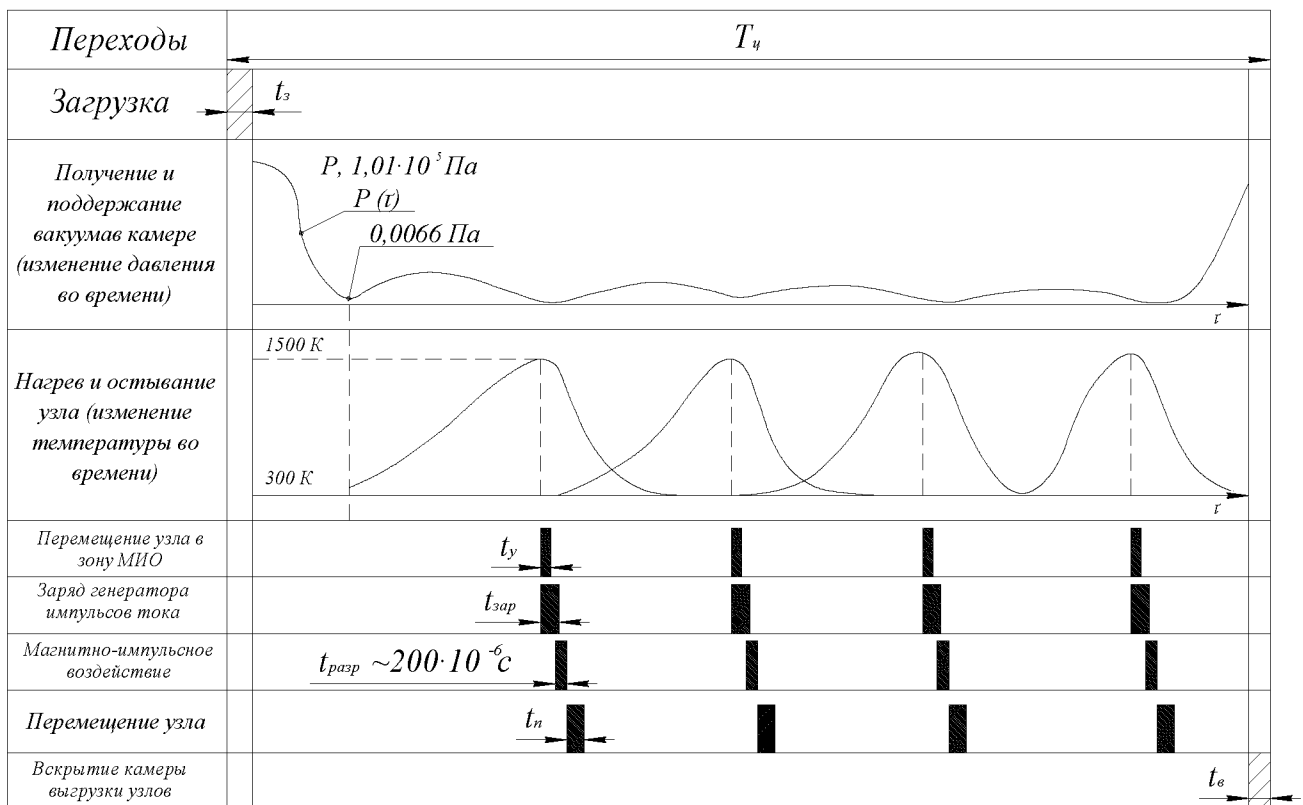


Рис.68. Циклограмма работы установки МИСВ



Основными элементами ГИТ являются: зарядное устройство, емкостной накопитель энергии, блок поджига коммутирующих устройств, блок управления. Синхронная работа игнитронов ИРТ-6 ёмкостного накопителя обеспечивается схемой поджига коммутируемой одним разрядником типа Р-24.

Технологический блок состоит из технологической камеры, вакуумной системы, системы ВЧ - разогрева. Технологическая вакуумная камера установки включает в себя многопозиционную охлаждаемую карусель, индуктор ТВЧ - разогрева, индуктор магнитно-импульсной обработки (МИО).

Свариваемый узел переводится в зону индукционного разогрева и индуктора МИО посредством ввода поступательного движения, присоединенного к электроприводу.

Работа всех блоков установок в комплексе обеспечивает в полуавтоматическом режиме все необходимые переходы техпроцесса магнитно-импульсной сварки в вакууме: вакуумирование технологической меры, перевод свариваемого узла в зону рабочих индукторов, индукционный разогрев, магнитно-импульсное воздействие. Производительность установки МИСВ "Импульс - БМ" в зависимости от свариваемого узла колеблется в пределах 1÷2 шт/час [46].

Установка "Импульс-БМ" изображена на рисунке 69. Данная установка позволяет осуществлять различные виды горячей обработки в вакууме в защитных средах: сборочные операции, прессование композиционных порошковых материалов, пайку охватывающих соединений с использованием давления импульсных магнитных полей.

Внедрение в серийное производство электровакуумных приборов разработанного техпроцесса и установки МИСВ "Импульс-БМ" позволило увеличить производительность изготовления катодных узлов и получить значительный экономический эффект.

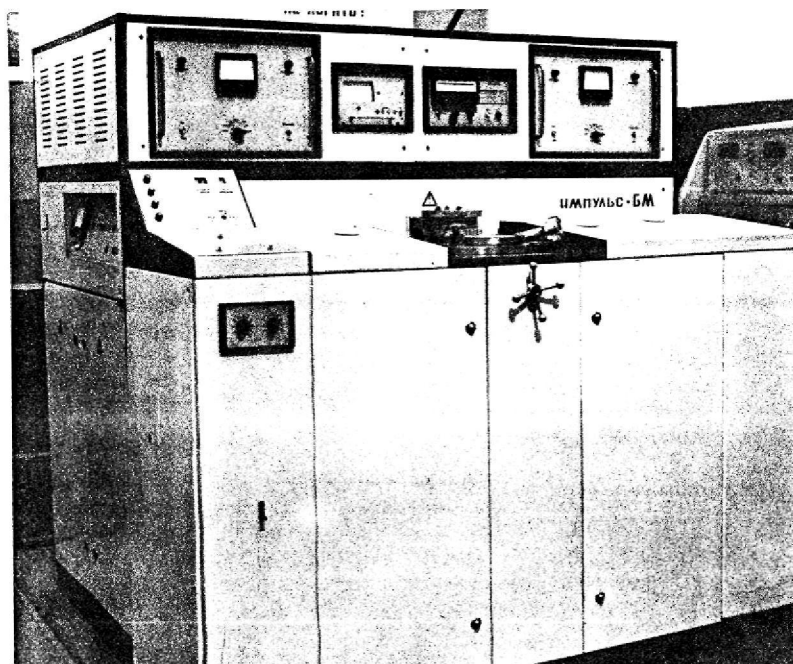


Рис. 69. Установка магнитно-импульсной сварки в вакууме "Импульс-БМ"

## Заключение

Данная работа относится к области создания технологии и оборудования специальных методов магнитно-импульсной сварки для получения штампосварных трубчатых деталей, катодных узлов электровакуумных приборов и сварных конструкций типа "стержень - корпусная деталь". Исследования и разработки направлены на повышение качества сварных соединений и снижение трудоемкости изготовления сварных конструкций.

Решение данных задач потребовало исследования физических и технологических особенностей процессов соединения материалов в твердой фазе с использованием индуцированных токов с нагружением импульсным магнитным полем. На основе результатов анализа условий формирования соединений был разработан алгоритм расчёта и выбора параметров техпроцесса и оборудования для реализации различных разрядно-импульсных процессов.

В монографии описан принципиально новый комбинированный процесс магнитно-импульсной сварки-формовки. Обосновано использование данного способа для изготовления тонкостенных трубчатых деталей.

Описана оригинальная технология разрядно-импульсной сварки – прессования в вакууме с предварительным разогревом для получения облицовочных покрытий, приведены результаты исследований процесса ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом.

В работе определены условия качественной обработки и классифицированы разновидности приёмов магнитно-импульсной сварки.

Расчёт и выбор энергетических и временных параметров процесса и оборудования должен вестись с учётом электроэрозионной очистки, вакуумно-термической обработки, обеспечения необходимой степени деформации и условий твёрдофазного взаимодействия.

В монографии изложены проектные изыскания для создания автоматизированного оборудования, позволяющего от одного накопительного

блока осуществлять обработку нескольких деталей, совмещая вспомогательные операции.

Авторы монографии предлагают импульсную сварку с использованием магнитных полей совмещать с формообразованием, вакуумно-термической обработкой, ударной осадкой.

## Библиографический список

1. Дудин А. М. Магнитно-импульсная сварка металлов / А. М. Дудин. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
2. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие: в 2-х томах / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. П. Смоленцев и др. – М.: Высш. шк., 1983. – Т. I: Обработка материалов с применением инструмента. – 247 с., ил.
3. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
4. Бабат Г. Н. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. Н. Бабат. – М.: Энергия, 1965. – 552 с., ил.
5. Пат. 2110381 Россия. Способ получения сварных соединений листовых металлических материалов / А. Ф. Крутин, Н. А. Карандашев, А. Д. Глинберг; заявл. 23.11.97; опубл. 30.03.98.
6. Калеко Д. М. Ударная конденсаторная сварка / Д. М. Калеко, В. Э. Моравский, Н. А. Чвертко. – Киев: Наукова думка, 1984. – 307 с., ил.
7. Глущенко В. А. Магнитно-импульсные технологии изготовления из полых заготовок деталей и узлов летательных аппаратов и двигателей / В. А. Глущенко // Труды 1-ой Международной научно-технической конференции "Металлдеформ-99". – Самара: СГАУ, 1999. – С. 32-40.
8. Ечепурин В. П. Свойства биметаллических соединений, полученных магнитно-импульсной сваркой / В. П. Ечепурин // Сварочное производство. – 1974. - № 5. – С. 12-14.
9. Магнитно-импульсная сварка в вакууме с предварительным разогревом / Е. Л. Стрижаков, В. В. Курганов, Л. И. Янчевская // Сварочное производство. – 1981. - № 2. – С. 12-13.
10. Михайлов В. М. Импульсные электромагнитные поля / В. М. Михайлов. – Харьков: Вища школа, 1979. – 198 с., ил.
11. Кнопфель Г. Н. Сверхсильные импульсные магнитные поля /

Г. Н. Кнопфель. – М.: ММР, 1972. – 392 с., ил.

12. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей / В. Р. Карасик. – М.: Наука, 1964. – 528 с., ил.

13. Комбинированный процесс магнитно-импульсной формовки-сварки экранирующих корпусов – соединителей кабелей / Е. Л. Стрижаков, В. М. Евченко, В. В. Плотников // Сварные конструкции и технология их изготовления: сб. научн. ст. – Ростов н/Д: ДГТУ, 1998. – С. 99-101.

14. Кочергин К. А. Контактная сварка / К. А. Кочергин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.

15. Калеко Д. М. Возбуждение дуги при ударной конденсаторной сварке / Д. М. Калеко // Автоматическая сварка. – 1969. - № 1. – С. 17-20.

16. Хренов К. К. Ударная конденсаторная приварка шариков перьев авторучек / К. К. Хренов, И. Э. Хоменко // Сварочное производство. 1961. - № 5. – С. 23 -25.

17. Головейко А. Г. Теплофизические процессы на электродах в условиях мощного импульсного разряда / А. Г. Головейко // Электрические контакты: сб. науч. тр. – М.: Наука, 1973. – С. 23-28.

18. Особенности магнитно-импульсной сварки оболочковых конструкций / Е. Л. Стрижаков, В. В. Плотников, М. Ю. Бацемакин и др. // Тезисы докладов VI международной научно – технической конференции по динамике технологических систем / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2001. – Т. III. – С. 237-241.

19. Магнитно-импульсная штамповка-сварка оболочковых конструкций / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Карандашев, М. Ю. Бацемакин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. - № 3. – С. 12-14.

20. Классификация приёмов и исследование контактной магнитно-импульсной сварки / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, Д. С. Хохлов и др. // Сварочное производство. – 2003. - № 8. – С. 11-14.

21. Пат. 32713 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В21D 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.

22. Получение штамповарных замкнутых конструкций магнитно-импульсной сваркой / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, Д. С. Хохлов // Сварка на рубеже веков: тез. докл. науч. – техн. конф. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – С. 58.

23. Конюшков Г.В. Копылов Ю.Н. Диффузионная сварка в электронике. - М.: Энергия, 1974. - 167 с., ил.

24. Яблочников Б. А. Электродуговые магнитно-импульсные установки (ЭДМИУ) / Б. А. Яблочников // Труды 1-й Международной научно-технической конференции. – Самара: СГАУ, 1999. – С. 143-145.

25. Магнитно-импульсная сварка нахлесточных соединений экранирующих корпусов кабелей / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Карандашев, В. В. Плотников // Труды 1-й Международной научно-технической конференции. – Самара: СГАУ; 1999. – С. 89-91.

26. Гельман А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с., ил.

27. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.

28. Моравский В. Э. Ударная конденсаторная сварка деталей из высокопроводимых материалов / В. Э. Моравский, Д. М. Калеко // Автоматическая сварка. – 1964. - № 3. С. 27-31.

29. Дашук С. Л. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / С. Л. Дашук, В. С. Зайнец. – М.: Атомиздат, 1970. – 238 с., ил.

30. Миляк А. М. Индуктивно-ёмкостные преобразователи источников напряжения в источники тока / А. М. Миляк, Б. Е. Кубылин, И. В. Волков. – Киев: Наукова думка, 1969. – 182 с., ил.

31. Свериденко В. П. Экспериментальные исследования процессов деформирования металлов импульсным магнитным полем / В. П. Свериденко // Импульсные методы обработки металлов. – Минск: Наука и техника, 1977. – С. 19-23.

32. Фертик С. М. Магнитно-импульсная обработка металлов / С. М. Фертик, Н. В. Белый // Энергетика и электротехническая промышленность. 1964. - № 2. – С. 18-22.
33. Получение нахлесточных соединений индуцированными токами с использованием давления импульсного магнитного поля / Е. Л. Стрижаков, В. М. Евченко, В. В. Плотников и др. // Вестник ДГТУ. Сер. Проблемы материаловедения и сварочного производства. – 1999. – С. 62.
34. Плотников В. В. Экспериментальная установка магнитно-импульсной сварки / В. В. Плотников // Вестник ДГТУ. Сер. Проблемы материаловедения и сварочного производства. 1999. – С. 62.
35. Магнитно-импульсная контактная сварка-формовка оболочковых конструкций / Е. Л. Стрижаков, В. В. Плотников, В. М. Евченко // Сварочное производство. – 2000. - № 11. – С. 37-39.
36. Миронов В. А. Магнитно-импульсное прессование порошков / В. А. Миронов. – Рига: Зинатне, 1980. – 286 с., ил.
37. К вопросу расчётной оценки режимов сварки давлением / М. Х. Шоршоров, Ю. П. Красулин, И. И. Метёлкин // Сварочное производство. – 1967. - № 7. – С. 14-17.
38. Bonan C. Mikroscheissen mit dem kondensatorentladduggeret / C. Bonan – Praktiker, 1973. - 25, № 3. – P. 54-56.
39. Основные стадии образования соединения в процессе сварки импульсными индуцированными токами с использованием магнитного давления / Е. Л. Стрижаков, О. В. Яценко, В. В. Плотников и др. // Известия ВУЗов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2001. - № 2. – С. 21-22.
40. 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.
41. А. с. 849640 СССР. Устройство магнитно-импульсной сварки / Е. Л. Стрижаков - заявл. 15.04.79; опубл. 03.08.81.
42. Стрижаков Е. Л. Автоматизированная установка МИШ /



Е. Л. Стрижаков // Электронная техника. Сер. 7. – 1991. Вып. 5 (168).

43. Инженерная модель теплофизических процессов при магнитно-импульсной сварке тонких образцов / Е. Л. Стрижаков, О. В. Яценко, В. В. Плотников и др. // Вестник ДГТУ. Сер. Проблемы производства машин. – 2000. – С. 120-122.

44. Николаев Г. А. Специальные методы сварки / Г. А. Николаев, И. А. Ольшанский. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с., ил.

45. Экспериментальные исследования процесса контактной магнитно-импульсной сварки / В. В. Плотников, О. В. Яценко, Р. К. Юсупова // Известия ВУЗов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2001. - № 3. – С. 38-41.

46. Установка магнитно-импульсной сварки в вакууме / В. В. Полторопавлов, Е. Л. Стрижаков, Ю. А. Трюкан // Электронная техника. Сер. 7. – 1986. Вып. 2 (135). – С. 32-35.

47. РД 11.14.33-20-90. Технические требования к технологическому процессу вакуумно-термической магнитно-импульсной обработки НИИТОП. – Горький, 1981. – 53 с.

48. РМ 110.55.012-81. Магнитно-импульсная обработка / МЭП. НИИТОП. – Горький, 1981. – 40 с.

49. Некоторые особенности процесса магнитно-импульсной сварки в вакууме / Е. Л. Стрижаков, М. Х. Шоршоров, А. И. Асотов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. - № 5. – С. 17-19.

50. Использование импульсных магнитных полей в производстве изделий электронной техники / В. В. Курганов, А. В. Миненко, В. Я. Огнев // Электронная промышленность. – 1985. Вып. 1. – С. 17-21.

51. Курганов В. В. Применение вакуумно-термического магнитно-импульсного прессования для нанесения композиционных покрытий / В. В. Курганов, Е. Л. Стрижаков // Порошковая металлургия. – 1988.-№ 11. – С. 9-12.

52. Выбор конструктивных параметров индукторов магнитно-импульсной обработки / Е. Л. Стрижаков, В. П. Петровский, В. Т. Чемерис // Электронная

промышленность. – 1990. - № 12. – С. 15-17.

53. Автоматизация и механизация производственных процессов в машиностроении / Под ред. Г.А. Шаумяна. – М.: Машиностроение, 1967. – 420 с.

54. Магнитно-импульсная сварка трубок бытовых холодильников / К. К. Хренов, В. А. Чудаков, П. М. Козолуп и др. // Автоматическая сварка. – 1970. - № 8. – С. 11-15.

55. Компьютерная имитация кинетика сваривания при импульсных термомеханических процессах / В. В. Плотников, О. В. Яценко, Р. К. Юсупова // Тезисы докладов VI международной научно-технической конференции по динамике технологических систем / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2001. – Т. III. – С. 260-263.

56. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных конструкций металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. – Харьков: Мост – Торнадо, 2002. – 288 с.

57. Анализ комбинированного процесса магнитно-импульсной сварки - формовки (МИСФ) / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, С. В. Нескоромный // Сварочное производство: сб. молодых учёных. – Ростов н/Д, 2006. – С. 43-52.

58. Бацемакин М. Ю. Экспериментальная установка магнитно-импульсной сварки в вакууме (ЭУМИСФВ) / М. Ю. Бацемакин, С. В. Нескоромный // Сварочное производство: сб. молодых учёных. – Ростов н/Д, 2006. – С. 37-42.

59. Трехканальная автоматизированная установка магнитно-импульсной штамповки сварки / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Карандашев, М. Ю. Бацемакин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. - № 2. – С. 17-20.

60. Classification of methods and examination of the process of resistance magnetic-pulse welding / E. L. Strizhakov, M. YU. Batsemakin, O. V. Yatsenko etc. // Welding International. – 2004. – Vol. 18 (1). – P. 57-60.

61. Бацемакин М. Ю. Полуавтомат магнитно-импульсной сварки-формовки замкнутых тонколистовых конструкций / М. Ю. Бацемакин,

П. В. Сарычев // Вестник ДГТУ. – 2004. – Т. 4 № 2 (20). – С. 191-195.

62. Бацемакин М. Ю. Магнитно-импульсная сварка в приборостроении / М. Ю. Бацемакин, П. В. Сарычев // Сборник трудов научно – технической конференции «Эффективные материалы, технологии и оборудование для сварки плазмы, нанесение покрытий, металлообработки и порошковой металлургии». – Ростов н/Д, 2004. – С. 83-84.

63. Пат. 2228826 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В23К 20/06, В21D 26/12. Способ получения штампосварных замкнутых конструкций из листовых металлических материалов / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Карандашев, М. Ю. Бацемакин и др. – № 2002122554/02; заявл. 20.08.2002; опубл. 20.05.2004, Бюл. № 14.

64. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Хахин, М. Ю. Бацемакин и др. // Автоматическая сварка. – 2004. - № 2 (610). – С. 53-55.

65. Оборудование магнитно-импульсной сварки-формовки / Е. Л. Стрижаков, Н. А. Хахин, М. Ю. Бацемакин // Тезисы докладов II международной научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов и процессов деформирования» – Самара, 2004. – С. 27.

66. Компьютерное моделирование контактной магнитно-импульсной сварки. Ч. 1: Динамика, тепло - и электрофизика процесса / М. Ю. Бацемакин, Е. Н. Ладоса, О. В. Яценко и др. // Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. – 2004. - № 2. – С. 14-18.

67. Гипотеза образования соединений и методы выбора и расчёта параметров режимов и оборудования магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, С. В. Нескоромный // Известия вузов. Сев. - Кавк. регион. – 2005. – Спец. вып. – С. 72-74.

68. Условия качественной обработки и алгоритм расчёта 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.

69. Стрижаков Е. Л. Исследования процесса магнитно-импульсной сварки-формовки штампосварных тонкостенных трубчатых деталей / Е. Л. Стрижаков, М. Ю. Бацемакин, Р. В. Меркулов // Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: сб. докл. тр. междунар. науч. - техн. конф. – Самара, 2007. – С. 180-188.

70. Установка магнитно-импульсной обработки в вакууме "Импульс-БМ" / Е. Л. Стрижаков, В. М. Полторопалов, О. Н. Савенков // ВНИИМИ М., 1983. – Информ. листок № 83-0737.

71. Измерительный стенд для экспериментального исследования процесса магнитно-импульсной обработки металлов / Е. Л. Стрижаков, В. В. Курганов, А. В. Миненко // Электронная промышленность. - 1989. - Вып. 10. - С. 57.

72. Получение металлосплавленных эмиссионных покрытий с использованием импульсных магнитных полей / Е. Л. Стрижаков, В. О. Краснопольский, В. Д. Быченко // Электронная техника. Сер. 1. - 1982. – Вып. 9.

73. Вакуумно-термическое магнитно-импульсное прессование порошковых, композиционных покрытий / В. В. Курганов, Е. Л. Стрижаков, С. Ф. Сергеев, Е. П. Пыженко, Л. И. Шапиро // Электронная техника. Сер. 7, ТОПО. - 1988. - Вып. 1 (146). - С. 27 - 29.

74. Опыт внедрения технологии вакуумно-термического магнитно-импульсного прессования (ВТМИП) в производстве композиционных покрытий / В. В. Курганов, Е. Л. Стрижаков и др. // "Электрофизические технологии в порошковой металлургии". – М., 1990. - С. 58.

75. А. с. 1568349 СССР, МКИ<sup>3</sup> В21Д 26/14. Устройство магнитно-импульсной обработки / Е. Л. Стрижаков, А. В. Миненко, В. В. Курганов.- № 4352033/25-27; заявл. 27.10.87; зарег. 01.02.90.

76. Kem A. Yu. Technological features of obtaining of compound powder parts with usage innovative P/M processes for high performance metals-vacuum-thermal magneto-pulse pressing In / A. Yu. Kem, A. Bokov // Proc 16 Int. PLANSEE seminar Powder Metallurgical, High Performance Materials. - 2005, Reutte, Tirol,

Austria. - Vol. 1.

77. Получение порошковых функциональных градиентных материалов методом вакуумно-термического магнитно-импульсного прессования / Е. Л. Стрижаков, А. Ю. Кем, П. В. Сарычев // Физика и химия обработки материалов. – 2006. - № 3.

78. Конденсаторная сварка с динамическим приводом / С. В. Нескоромный, Р. В. Меркулов, А. В. Сальник // Сварка и Диагностика. АНО "Национальное Агентство Контроля и Сварки" (АНО "НАКС") - 2008. - № 3. - С. 5-16.

79. Источники питания для сварки: учеб. пособие / В. А. Ленивкин, В. М. Евченко, Е. Л. Стрижаков. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 274 с.

80. Электротехнологические процессы и оборудование: учеб. пособие / В. А. Ленивкин, Е. Л. Стрижаков. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 266 с.

81. Производство сварных конструкций: учеб. пособие / В. Ф. Лукьянов, Ю. Г. Людмирский, В. Я. Харченко. – Ростов н/Д: РИО ДГТУ, 2006. – 334 с.

82. Пат. 70839 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В23К 20/06. Устройство для ударной конденсаторной сварки стержневых деталей с плоским основанием / С. В. Нескоромный Е. Л., Стрижаков. – № 2007130908/22; заявл. 13.08.07; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5. – 6 с.

83. Нескоромный С.В. Особенности процесса приварки стержневых деталей к корпусным основаниям с использованием динамического привода / С.В. Нескоромный. - Тезисы докладов VIII международной научно – технической конференции по динамике технологических систем / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2007. – Т. I. – С. 98 – 102.

84. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом / Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескоромный, Р. В. Меркулов // Сварочное производство. – 2009. - № 2. – С. 33 – 35.

85. Выбор и расчет параметров режима ударной конденсаторной сварки с

магнитно-импульсным приводом / Е.Л. Стрижаков, С.В. Нескоромный // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. Т. 10 №6 (49) к 80 летию университета. – С. 76-80.

86. Алгоритм выбора и расчета параметров процесса и оборудования конденсаторной сварки стержневых деталей с тонкостенными / Е.Л. Стрижаков, С.В. Нескоромный, П.В. Горбунов // Сварочное производство: сб. тр. молодых учёных/ДГТУ – Ростов н/Д, 2011. – С. 41 – 45.



## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> .....	1
<b>Глава 1. Импульсные методы конденсаторной сварки</b> .....	3
1.1. Ударная конденсаторная сварка.....	3
1.2. Технология сварки импульсной дугой.....	8
1.3. Магнитно-импульсная сварка с косым соударением.....	10
<b>Глава 2. Магнитно-импульсная сварка-формовка</b> .....	21
2.1. Проблемы получения трубчатых деталей сложной формы.....	21
2.2. Принцип магнитно-импульсной сварки-формовки (МИСФ).....	25
2.3. Анализ процесса МИСФ.....	30
2.4. Экспериментальное оборудование и оснастка.....	43
2.5. Разработка технологии МИСФ корпусов заделки кабеля.....	56
<b>Глава 3. Магнитно-импульсная сварка в вакууме</b> .....	63
3.1. Особенности получения облицовочных эмиссионных покрытий.....	63
3.2. Принцип магнитно-импульсной сварки в вакууме (МИСВ).....	67
3.3. Анализ процесса МИСВ.....	72
3.4. Экспериментальное оборудование, инструмент и оснастка.....	84
3.5. Разработка технологии МИСВ катодных узлов.....	92
3.6. Исследование и разработка технологии прессования – сварки композиционных порошковых покрытий.....	97
<b>Глава 4. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом (УКС с МИП)</b> .....	101
4.1 Проблема получения сварных соединений типа «стержень- корпусная деталь».....	101
4.2. Принцип метода УКС с МИП.....	106
4.3 Параметры, влияющие на качество сварного соединения.....	109
4.4. Разработка экспериментального оборудования, и опытной технологии.....	114



<b>Глава 5. Разработка промышленного спецтехнологического оборудования.....</b>	<b>121</b>
5.1. Выбор и расчет параметров технологии и оборудования магнитно-импульсной сварки.....	121
5.2. Исследования параметров разрядного контура генератора импульсов тока.....	124
5.3. Разработка многоканального промышленного оборудования.....	129
5.4. Установка магнитно-импульсной сварки в вакууме.....	134
<b>Заключение</b>	<b>138</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>140</b>