PVA TePla
Industrial Vacuum Systems

c.BOND

Уникальная концепция установки для сварки алюминиевых материалов



Основные преимущества

Уникальная технология кондуктивного нагрева

Прямая передача тепла от нагревательного элемента к соединяемым деталям открывает новые возможности для использования установки

Энергоэффективность и экономичность

Экономия энергии до 40% и времени до 25% при нагревании по сравнению с традиционными установками диффузионной сварки

Возможность индивидуализации процессов

Оптимально адаптированный и автоматизированный процесс дуффузионной сварки алюминиевых деталей

Диффузионная сварка в условиях высокого вакуума

Высоковакуумная насосная система с диффузионным насосом обеспечивает разрежение свыше $1x10^{-5}$ мБ и позволяет достичь чистоту технологической газовой среды

Простота в использовании

Наличие центрального узла для подачи питания и единая система транспортировки установки гарантируют высокую производительность

Простота в обслуживании и компактность установки

Оптимальный доступ к системам установки обеспечивает эффективное обслуживание отдельных модулей, а наличие подключаемых модулей позволяет достичь наименьшее время простоя

Инновационный дизайн

Инновационный дизайн установки диффузионной сварки в закрытом исполнении подчеркивает компактность конструкции, придает системе презентабельный внешний вид и в то же время позволяет внешне оценить все необходимые системные и технологические характеристики конструкции





metals

IMPACT FACTOR 2,9

CITESCORE 4.4

Обзор

Импульсная диффузионная сварка под давлением: обзор технологии и прогноз развития

Абдулазиз Аль-Хазаа, Нильс Ханеклаус и Зейад Альмутаири

MDPI

https://doi.org/10.3390/met11020323

Обзор

Импульсная диффузионная сварка под давлением: обзор технологии и прогноз развития

Абдулазиз Аль-Хазаа 1,2,*, Нильс Ханеклаус 2,* и Зейад Альмутаири 3,4,5

1 Исследовательский центр трибологии и наук о поверхностном слое, факультет физики и астрономии, научный колледж, Университет короля Сауда, Эр-Рияд 11451, Саудовская Аравия
2 Институт нанотехнологий короля Абдаллы, Университет короля Сауда, Эр-Рияд 11451, Саудовская Аравия
3 Факультет машиностроения, Инженерный факультет, Университет короля Сауда, Эр-Рияд 11451, Саудовская Аравия; zaalmutairi@ksu.edu.sa
4 Центр устойчивых энергетических технологий (SET), Университет короля Сауда, Эр-Рияд 11451, Саудовская Аравия
5 Парк атомной и возобновляемой энергетики им. короля Абдуллы (KACARE), Центр энергетических исследований и инноваций в Эр-Рияде, Эр-Рияд 11451, Саудовская Аравия
* Контакты: aalhazaa@ksu.edu.sa (AA); nhaneklaus@ksu.edu.sa (Нью-Хэмпшир)

Поступило в печать: 14 января 2021 г.
Принято в печать: 9 февраля 2021 г.
Опубликовано: 12 февраля 2021 г.

Аннотация: Диффузионная сварка — это метод сварки в твердом состоянии, используемый для сварки одинаковых и разнородных материалов. Относительно длительное время обработки, обычно порядка нескольких часов, а также необходимость в тонкой полировке поверхностей затрудняют применение диффузионной сварки в других производственных процессах и ограничивают широкое использование этой технологии. Некоторые исследования указывают на то, что изменение давления во время диффузионной сварки в отличие от традиционного метода с использованием постоянного давления может сократить общее время обработки и сварки материалов. Такие процессы называются импульсной диффузионной сваркой под давлением (ИДСПД), и они впервые рассматриваются в этой работе с использованием методологии PRISMA (Предпочтительные позиции (элементы) для систематического обзора и мета-анализа). Результаты обзора показывают, что изменение давления действительно может сократить время соединения при диффузионной сварке и снизить требования к предварительной подготовке поверхностей. Требуются дополнительные исследования, которые должны выйти за рамки использования образцов небольших и простых геометрических форм и сконцентрироваться на том, чтобы сделать ИДСПД доступным для промышленных приложений.

Ключевые слова: диффузионная сварка; соединение в исчезающей жидкой фазе; импульсное давление; разнородные соединения

1. Введение

Диффузионное соединение, также известное как диффузионная сварка, представляет собой метод сварки в твердом состоянии, при котором две поверхности соединяются под воздействием высокой температуры и механического давления в вакууме или неокисляющей среде [1]. Диффузионная сварка — это высокотехнологичный процесс, который был первоначально разработан в Советском Союзе (а вскоре после этого и в США) в 1960-х годах для легких деталей аэрокосмической промышленности. Сегодня диффузионная сварка используется в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, нефтехимическая и энергетическая. Диффузионную сварку можно использовать для соединения разнородных деталей и создания голоэдрических структур, таких как каналы охлаждения в пластинчатых теплообменниках. По сравнению с альтернативными технологиями соединения, такими как пайка и склеивание, диффузионная сварка относительно дорога. Кук и Атье [2] определили относительно длительное время сварки (процесс диффузионной сварки металлов обычно требует от 30 минут до нескольких часов) как основную ключевую проблему, которую необходимо преодолеть, чтобы лучше внедрить диффузионную сварку в другие производственные процессы.

При диффузионной сварке обычно различают три этапа, как показано на Рис. 1. Свариваемые материалы плотно соприкасаются по сопрягаемым поверхностям, на которых появляются неровности. В дальнейшем неровности необходимо будет устранить, чтобы создать прочную связь.

На первом этапе обычно применяется давление для деформации неровностей и, следовательно, увеличения площади соприкосновения двух поверхностей. Качество обработки поверхности является важным фактором при диффузионной сварке, поскольку необходимо устранить более крупные неровности в случае, если поверхности не удалось должным образом отполировать при подготовке к процессу диффузионной сварки [3,4]. Приложенное давление еще больше разрушит защитный оксидный слой сопрягаемых поверхностей и создаст межфазные границы. На втором этапе границы зерен продолжат мигрировать и поры вдоль линии соприкосновения будут сокращаться. На последнем, 3 этапе, поры будут в значительной степени устранены за счет объемной диффузии, а соединение станет однородным. Если процесс будет выполнен должным образом, то будет образовано соединение высочайшего качества, которое по своим свойствам практически неотличимо от свариваемых материалов и имеет прочность, почти такую же высокую, как и свариваемые материалы.

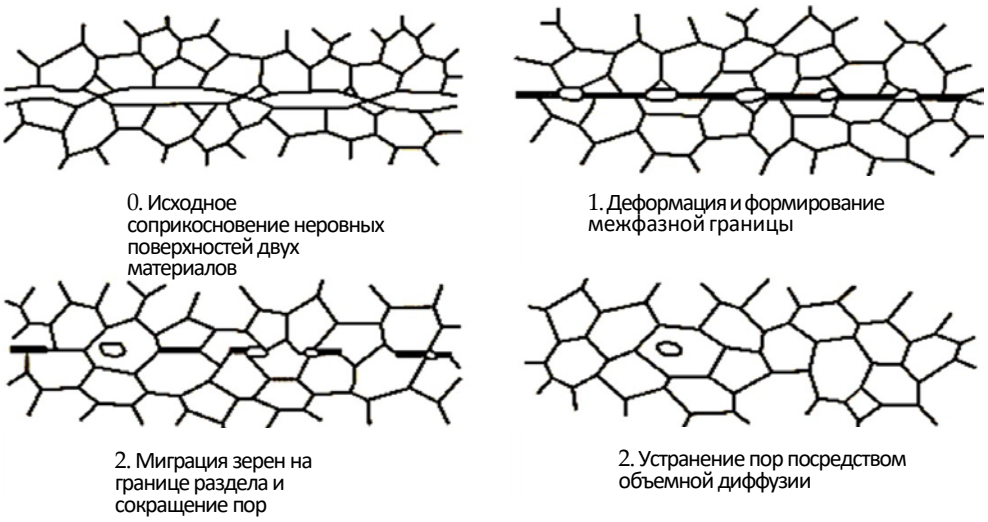


Рисунок 1. Обзор различных этапов диффузионной сварки

Температура, время и давление сварки являются наиболее важными параметры, характеризующими процесс диффузионной сварки. Помимо этих трех основных параметров, указывается атмосфера (обычно качество вакуума или атмосферы защитного газа), степень обработанности поверхности или шероховатость и промежуточные слои (если они применяются).

Чтобы сократить время соединения в процессе диффузионной сварки, Кук и Атье [2] предложили использовать наноструктурированные промежуточные слои. Использование тонких промежуточных слоев, которые плавятся во время диффузионной сварки, не является новым процессом, а называется «соединение в исчезающей жидкой фазе», которое может значительно сократить время сварки. Тонкая прослойка, которая имеет более низкую точку плавления по сравнению с исходными материалами и плавится ниже их температуры плавления, помещается между свариваемыми деталями. Промежуточный однородный элемент (или составной элемент, если используется промежуточный слой из сплава) диффундирует в основные материалы, вызывая изотермическое затвердевание при температуре соединения. В результате образуется соединение, имеющее более высокую температуру плавления, чем начальная температура соединения в исчезающей жидкой фазе [5–8]. Использование наноструктурированных промежуточных слоев, которые имеют высокую поверхностную энергию из-за большого отношения поверхности к объему, является разумным способом сокращения времени соединения (а часто даже температуры соединения) при диффузионной сварке или связанных с ней процессах, таких как вакуумная пайка [9–11].

Нанесение промежуточных слоев на детали сложной геометрии, например, на 10-200 пластин дуффузионно сваренных пластинчатых теплообменников для печатных плат [12] без перекрытия микроканалов конечного изделия может оказаться технически сложным и дорогостоящим. Таким образом, процессы, которые уменьшают время соединения без дополнительной предварительной обработки или использования наноматериалов (редких и, как следствие, дорогих), были бы наиболее желательными. Хорошим примером является процесс, предложенный Ширзади и Уоллахом [13–15] которые показали, что температурный градиент, перпендикулярный плоскости соединения, оказывает благоприятное воздействие на конечное качество соединения. Другие недавние многообещающие инновационные подходы в области диффузионной сварки могут включать объединение последовательной обработки поверхности и диффузионной сварки в одном процессе [16], а также осуществление искровой плазменно-диффузионная сварки [17–19].

Во время процесса диффузионной сварки нередко можно изменять температуру и давление. Сонг и др. [20], например, использовали двухэтапный процесс диффузионной сварки для соединения нержавеющей стали 316L со сплавом Ti. При этом образцы сначала нагревают до 750°C и выдерживают под нагрузкой 30 МПа в течение 20 минут, прежде чем перейти ко второму этапу диффузионной сварки, на котором образцы подвергаются диффузионной сварке при температуре 900°C и давлении 5 МПа на протяжении еще 30–120 мин.

Вместо изменения температуры и давления только два раза в течение процесса, как это обычно принято, можно выполнять быстрые импульсные изменения обоих параметров более двух раз. В своем исследовании Шэн и др. [21] быстро меняли температуру во время диффузионного сваривания Ti (TA17) с нержавеющей сталью 304. Помимо быстрых изменений температуры, которые мало влияют на эффективность процессов обработки более крупных деталей в вакуумной печи с индукционным нагревом, быстрые изменения давления являются еще одним многообещающим процессом сокращения времени обработки при диффузионной сварке. Быстрое изменение давления во время диффузионной сварки — это процесс, называемый импульсной диффузионной сваркой под давлением (ИДСПД) или диффузионной сваркой с импульсным давлением (ДСИД). В этой работе мы придерживаемся обозначения ИДСПД, поскольку данный процесс не обязательно выполнять в течение всего периода сварки. Более точным является тезис о том, что данный процесс «поддерживает» продолжающийся процесс диффузии за счет более эффективного разрушения защитного оксидного слоя на поверхности деталей. На Рис. 2 схематически показана разница между традиционной диффузионной сваркой с постоянным давлением сварки (Рис. 2а) и ИДСПД с различным давлением сварки (Рис. 2б).

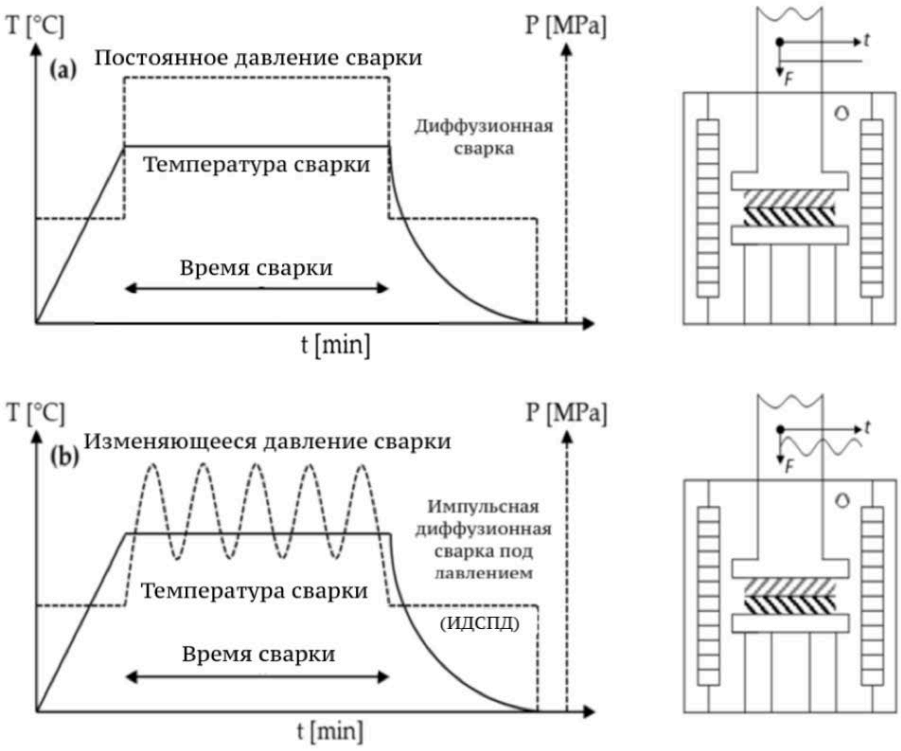


Рисунок 2. Схематическое сравнение температуры и давления сварки во время традиционного процесса диффузионной сварки (а) и импульсной диффузионной сваркой под давлением (ИДСПД) (б)

В этой работе впервые представлен критический обзор экспериментальных работ с использованием ИДСПД с целью количественной оценки того, в какой степени можно сократить время сварки и улучшить ее качество, применяя этот метод.

2. Используемые источники и методы исследования

Для проведения систематического обзора технологий мы использовали методологию PRISMA (Предпочтительные позиции (элементы) для систематического обзора и мета-анализа). Мы искали публикации с помощью Google Scholar и платформы Espacenet Европейского патентного ведомства. В общей сложности мы просмотрели более 300 записей в поисках изменений давления во время диффузионной сварки, из которых только 17 подходили для включения в этот обзор, поскольку эти исследования можно явно отнести к ИДСПД.

3. Обсуждение результатов исследования

Изменение давления для разрушения защитного оксидного слоя на поверхностях трудно свариваемых материалов является прямым способом улучшения диффузионной сварки. Это позволяет сократить время обработки или получить соединения более высокого качества при том же времени обработки, что и при традиционной диффузионной сварке, которая происходит без изменения давления. Идея использования систематических импульсов давления при диффузионной сварке принадлежит Институту электросварки имени Е. О. Патона Национальной академии наук Украины, расположенному в Киеве [22].

В нескольких публикациях сообщается о положительном эффекте изменения давления. Нораджитра и др. [23] сообщают, что использование динамического давления сокращает время диффузионной сварки тугоплавких металлов. Сюн и др. [24] использовали высокочастотные импульсы давления (140–170 Гц) для улучшения основных параметров обработки при сваривании алюминия с титаном. В случае алюминия (сплав ЛД2), где применялись импульсы с частотой 167 Гц, температура, время и давление сварки могут быть уменьшены с 520°C до 480°C, 210–60 мин. и 3–2,5 МПа соответственно, при этом прочность сварного шва, которая измерялась при испытаниях на растяжение, была повышена с 72 до 106 МПа. В случае с Ti (ТС4), где применялись импульсы с частотой 140 Гц, температура и время сварки могут быть снижены с 1280°C до 1000°C и с 90 до 45 мин. соответственно, при этом прочность сварного шва, измерявшаяся при испытаниях на растяжение, увеличилась со 102 до 144 МПа. Давление сварки было незначительно увеличено с 2 до 2,5 МПа.

Исследовательские группы из Чунцинского университета в Китае (Факультет материаловедения и инженерии) и Индийского технологического института (ИИТ) в Рурки (Факультет машиностроения и промышленной инженерии) провели систематический анализ ИДСПД, который наиболее важен для данного обзора.

3.1. Результаты исследований группы Чунцинского университета

В своих исследованиях Цинь и др. [25] сообщили о первых экспериментах ИДСПД с Ti (TA17) и нержавеющей сталью 304, которые указывают на преимущества ИДСПД по сравнению с традиционной диффузионной сваркой при постоянном давлении. ИДСПД тех же материалов впоследствии систематически исследовалась Юанем и др. [26]. Сначала была определена оптимальная температура сварки, которая составила 825°C (см. Рис. 3а). В дальнейшем были оптимизированы максимальное давление импульсов (Рис. 3б), количество импульсов (Рис. 3в) и частота импульсов (Рис.3г), как показано на Рис.3.

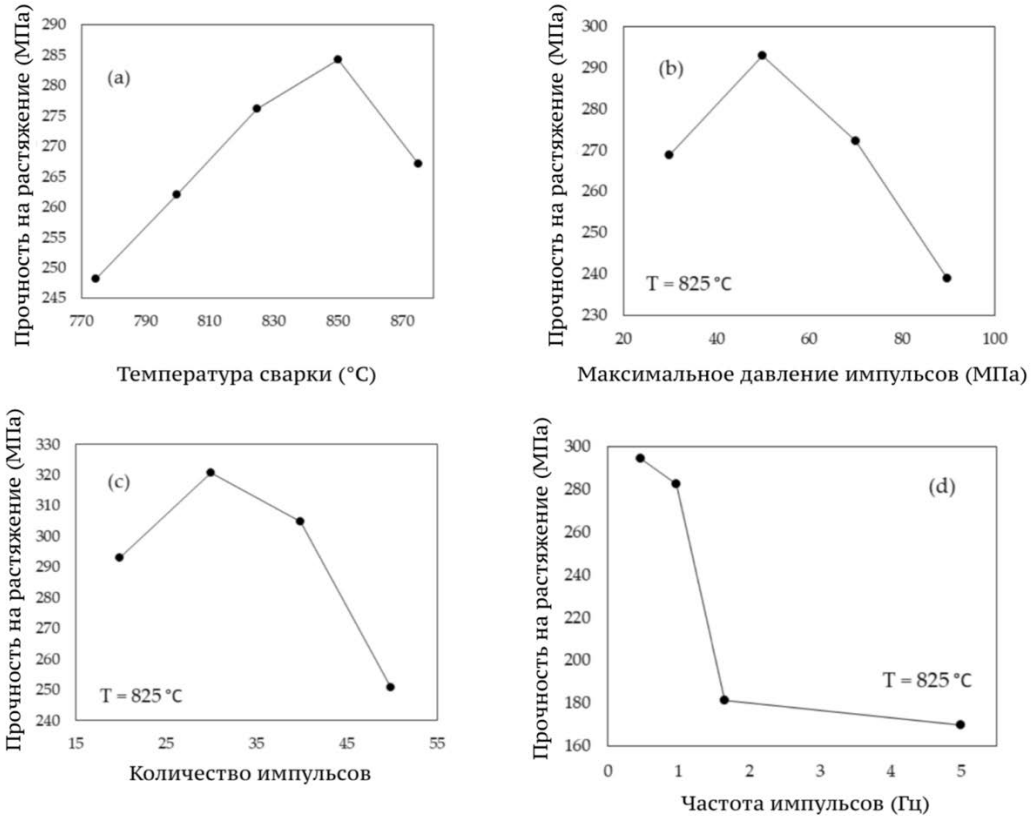


Рисунок 3. Оптимизация параметров ИДСПД: (а) температура сварки, (б) максимальное давление импульсов, (в) количество импульсов и (г) частота импульсов при сварке Ti (TA17) с нержавеющей сталью 304 (составлено на основе данных Yuan et al. [26])

После этих первоначальных экспериментов исследователи из Чунцинского университета применили ИДСПД для сваривания металлокерамического TiC с нержавеющей сталью марки 304 с использованием промежуточного слоя Ti/Cu/Nb (30/20/30 мкм) [27] и промежуточного слоя Ti/Nb (20/30 мкм) [28]. Наилучшие результаты были достигнуты при температуре сварки 885°C и 890°C со временем сварки 5 и 10 минут соответственно. В обоих исследованиях использовались колебания давления от 2 до 10 МПа при частоте

импульсов 0,5 Гц и разрежении в 1×10^{-3} Па. В ходе исследований сравнивались результаты при различном времени сварки (2,3,5,7 и 8 мин. и 4,6,8,10, и 12 мин.), при этом все остальные параметры оставались неизменными. Прямого сравнения между ИДСПД и диффузионной сваркой при постоянном давлении проведено не было. Ли и Шенг [28], однако, отмечают, что благодаря ИДСПД время сварки, необходимое для традиционной диффузионной сварки аналогичных материалов, может быть значительно сокращено с 45-120 минут до 10 минут (время приводится для конкретных условий данного исследования).

Та же исследовательская группа также провела эксперименты с ИДСПД титана чистотой на уровне доступных коммерческих образцов с чистой нержавеющей сталью 304 с использованием промежуточного слоя Ni (толщиной 200 мкм) в вакууме при температуре 850°C и давлении от 8 до 20 МПа [29]. Достигнутый предел прочности при растяжении в 358 МПа сопоставим с результатами, которые получаются при традиционной диффузионной сварке и соединении в исчезающей жидкой фазе для тех же материалов [30]. Однако было достигнуто значительное сокращение времени соединения на 60-180 с. Необходимое время сварки при ИДСПД было в 60 раз меньше, чем при традиционной диффузионной сварке этих же материалов (60-180 мин). Эксперименты были основаны на предыдущих экспериментах ИДСПД по соединению Ti-4Al-2V и нержавеющей стали 304 с различными прослойками Ni в виде нанопорошка (d = 20 мкм), покрытия (толщиной 10, 15 и 20 мкм) и фольги (толщиной 13 мкм), которые показали наилучшие результаты и качество сварного шва [31]. Использовались различные импульсы давления: 8-30, 8-30, 8-50 и 8-80 МПа с частотой 0,5 Гц. Прямое сравнение между образцами, полученными с использованием статического давления и ИДСПД, также не было проведено. Эффективное время соединения составило всего 180 с.

Несколько меньший предел прочности при растяжении – 346 МПа – был достигнут Денгом и др. [32] при ИДСПД титана чистотой на уровне доступных коммерческих образцов с чистой нержавеющей сталью 304 с использованием промежуточного слоя Cu (толщиной 50 мкм) в вакууме при температуре 850°C и давлении 8-20 Мпа. Наряду с предыдущими экспериментами эффективное время соединения снова составило всего 180 с.

Исследовательская группа из Чунцинского университета дополнительно провела эксперименты по ИДСПД с использованием чистой меди и нержавеющей стали марки 304L с промежуточным слоем Ni (12,5/50 мкм) и без него, изучив различное время соединения (5, 10 и 20 мин) и температуру соединения (825, 850 и 875°C) при разрежении в 5×10^{-2} Па и изменении давления от 5 до 20 МПа с частотой 0,5 Гц [33]. Наилучшие результаты были получены при использовании промежуточного слоя Ni толщиной 12,5 мкм при температуре 850°C и времени соединения 20 минут. Авторы отмечают, что по сравнению с другими исследованиями [30], в которых использовалось постоянное давление, количество микропустот можно было значительно уменьшить, используя переменное давление. Группа также использовала ИДСПД для соединения чистой меди (толщиной 100 мкм) и нержавеющей стали марки 304 L при температуре 850°C, времени соединения 20 мин и импульсном давлении 5-20 МПа с частотой 0,5 Гц. Впоследствии магний AZ31 был сварен с Cu при температуре 520°C, а также 495°C и постоянном давлении 2 МПа [34].

3.2. Результаты исследований группы Индийского технологического института в Рурки

В Индийском технологическом институте (ИИТ) в Рурки была проведена очередная серия систематических экспериментов по ИДСПД. Помимо сокращения времени обработки по сравнению с традиционной диффузионной сваркой, еще одним важным мотивом использования ИДСПД была предполагаемая возможность осуществления диффузионной сварки относительно шероховатых поверхностей. Поэтому первые эксперименты были сосредоточены на сравнении ИДСПД, которая проводилась на образцах ферритной нержавеющей стали с различной степенью обработкой поверхности [35]. Шлифование поверхности с шероховатостью 2,29 мкм сравнивали с грубой полировкой (шероховатость 0,72 мкм) и тонкой полировкой (шероховатость 0,02 мкм). Использовали импульсные давления 20, 30 и 40 МПа при длительности пульсации 180 с (6 импульсов по 30 с), 360 с (6 импульсов по 60 с) и 540 с (6 импульсов по 90 с) соответственно. Температура сварки была установлена на уровне 850°C, а общее время сварки составило 30 минут. В начале процесса диффузионной сварки, когда была достигнута необходимая температура для соединения, была произведена пульсация давление. Несмотря на то, что по сравнению с традиционной диффузионной сваркой ИДСПД, по-видимому, лучше подходит для сваривания деталей с шероховатыми поверхностями, наиболее высокие результаты все же были достигнуты при использовании тонко отполированной поверхности (0,02 мкм). В этих экспериментах было доказано, что наилучшие диффузионные связи достигаются при максимальном давлении 40 МПа и времени пульсации 540 с.

Аналогичным образом, эксперименты ИДСПД были проведены для ферритной низкоуглеродистой стали с использованием промежуточного слоя из фольги Ag толщиной 40 мкм [36]. Для этих экспериментов температура была слегка повышена до 875°C, а импульсное давление снижено до 10 МПа. В общей сложности было установлено, что только 10 импульсов давления обеспечивают наилучшее качество соединения при повторном использовании времени сваривания в 30 минут.

Та же ферритная низкоуглеродистая сталь (шероховатость поверхности: 0,85 мкм) была использована для дополнительных экспериментов по ИДСПД [37], в которых были специально изучены пустоты после диффузионного соединения, так как ранее было высказано предположение, что ИДСПД может уменьшить количество этих пустот. Предполагается, что ИДСПД разрушает оксидный слой и заполняет пустоты на границе раздела, возникающие из-за неровностей, за счет пластического течения металла в области перекрытия. На рисунке 4 показаны результаты исследований Шармы и Двиведи [37], которые сравнили различные максимальные давления (Pmax = 20, 30 и 40 МПа) и различное количество импульсов (0, 6 и 18) в зависимости от количества и размера пустот на диффузионно-связанных поверхностях раздела. С этой целью были проанализированы характерные длины диффузионного слоя в 400 мкм. Общее количество пустот явно уменьшилось при приложении максимального давления со 130 (Pmax = 20 МПа) до 86 (Pmax = 30 МПа) и, наконец, до 62 (Pmax = 40 МПа). То же самое справедливо и для количества импульсов, при которых пустоты уменьшаются после увеличения частоты пульсации: со 116 (0 импульсов) до 87 (6 импульсов) и 75 (18 импульсов).

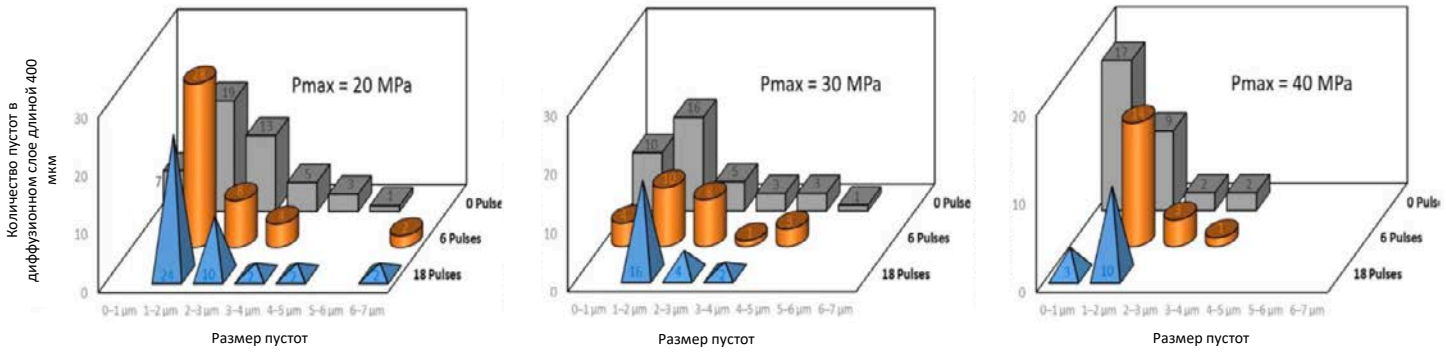


Рисунок 4. Влияние максимального давления (Pmax = 20, 30 и 40 МПа) и количества импульсов (0, 6 и 18) на количество и размер пустот вдоль поверхности соединения образцов ферритной нержавеющей стали, изготовленных методом ИДСПД по данным Шармы и Двиведи [37].

Шарма и Двиведи [37] в своей работе пришли к выводу, что использование ИДСПД (18 импульсов при Pmax = 40 МПа) позволило улучшить качество соединения почти на 44% (значение измерено с помощью испытаний на сдвиг) по сравнению с традиционной диффузионной сваркой, выполняемой с использованием постоянного давления.

Успешно разработанный в ИИТ технологический процесс ИДСПД был вновь использован для сварки ферритной стали с повышенной прочностью на ползучесть (CSEF P92) и более высокой шероховатостью поверхности (0,52 мкм) [38]. ИДСПД была выполнена при температуре 1000°C и общем времени сварки 60 мин. Пульсацию давления производили в течение 10 мин с импульсами, достигающими 20 МПа, и продолжительностью 10 с.

Другая серия систематических экспериментов по ИДСПД была проведена для сваривания нержавеющей стали марки 304 при различных температурах (850, 900 и 950°C), при максимальном давлении 15 МПа и минимальном давлении 7,5 МПа в течение 30 минут [39]. Для исследования полученных образцов проводились испытания на растяжение при сдвиге, а также было проведено исследование методами оптический микроскопии и сканирующей электронный микроскопии с полевой эмиссией. Образцы, изготовленные при температуре 950°C, показали наилучшие результаты. По сравнению с другими исследованиями, в которых образцы из нержавеющей стали марки 304 были сварены диффузионным способом [30], достигнутая прочность на сдвиг в 86 МПа находится на более низком уровне.

3.3. Обсуждение результатов

Хорошо известно, что повышенное давление при диффузионной сварке повышает качество соединения [40]. При диффузионной сварке обычно достигается баланс между требуемым минимальным давлением и допустимым максимальным давлением/деформацией заготовки. Ли и др. [41] демонстрируют, что если деформация не является проблемой и можно практически применить высокое давление, то за короткое время сварки (примерно вдвое меньшее, чем при сопоставимой диффузионной сварке с небольшой индуцированной деформацией) можно получить бездефектные соединения, прочность которых равна прочности исходных материалов. Высокое давление соединения вызывает значительную макроскопическую деформацию, которая разрушает оксидный слой, способствует исчезновению пустот и улучшает зернистую структуру в месте соединения, что, в свою очередь, способствует диффузии. В исследованиях диффузионной сварки редко сообщается о деформации образцов или заготовок, и в приведенных в обзоре источников таких упоминаний также практически не имеется. В одном из рассмотренных отчетов Хан и др. [42] упоминают о сжатии при сварке материала на 16%, что значительно превышает уровень <2%, требуемый при традиционной диффузионной сварке. Чтобы лучше понять, было ли достигнуто улучшение качества соединения в результате перепадов давления или повышения давления, следует указать деформацию во время процесса. Большая деформация, составляющая более 2% для образцов очень простой геометрии, использованных обеими исследовательскими группами в этом обзоре, ставит вопрос о том, в какой степени ИДСПД можно применять для соединения более крупных промышленных деталей. В крупных промышленных печах для диффузионной сварки обычно используется более одной заготовки, к которой прикладывается давление, и необходимо будет изучить вопрос о том, можно ли на самом деле реализовать ИДСПД должным образом и обеспечить соединение гораздо больших поверхностях с одинаково высоким качеством.

Помимо фактического времени сваривания материалов при диффузионной сварке значительное время уходит на контролируемый нагрев и охлаждение образцов (в особенности – крупных образцов). Контролируемый нагрев и охлаждение, поскольку они часто выполняются в вакууме, вследствие чего заготовки не подвергаются чрезмерным нагрузкам, могут легко превысить фактическое время сваривания. Даже если ИДСПД обещает сократить время сварки, необходимо выяснить, в какой степени это оказывает существенное влияние на общее время обработки.

4. Обсуждение результатов исследования

Рассмотренные здесь лабораторные эксперименты показали, что ИДСПД является многообещающим инновационным подходом к усовершенствованию традиционной диффузионной сварки, может сократить время сваривания и обеспечить сварку деталей с большей шероховатостью по сравнению с традиционной диффузионной сваркой. Необходимы дополнительные систематические эксперименты, в частности, эксперименты с более крупными деталями, увеличенными площадями сварного шва и увеличенным количеством деталей (так как большое количество деталей используются, например, в слоистых конструкциях пластинчатых теплообменников), чтобы лучше понять, в какой степени ИДСПД можно использовать в промышленности. В последующих экспериментах ИДСПД необходимо сообщать о деформации образца или заготовки, чтобы лучше отличить влияние изменения давления от влияния повышения давления. Кроме того, следует проводить количественные испытания, такие как испытания на растяжение или испытания на сдвиг при растяжении, для получения данных, которые можно сравнить с другими экспериментальными работами. В этом контексте следует отдавать предпочтение распространенным материалам, таким как нержавеющая сталь, а не более редким, поскольку это позволяет лучше сравнить применяемый технологический процесс.

Вклад авторов: Все авторы обсудили содержание, проанализировали данные, просмотрели, отредактировали рукопись и согласились с опубликованной версией рукописи. Все авторы ознакомились с опубликованной версией рукописи и согласились с ней.

Финансирование: Это исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: Данные, представленные в этом исследовании, находятся в открытом доступе.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список источников:

1. Kazakov, N.F. *Diffusion Bonding of Materials*; Pergamon Press: Oxford, UK, 1985; ISBN 978-1483118130.
2. Cooke, K.O.; Atieh, A.M. Current Trends in Dissimilar Diffusion Bonding of Titanium Alloys to Stainless Steels, Aluminium and Magnesium. *J. Manuf. Mater. Process.* **2020**, *4*, 39. [CrossRef]
3. Haneklaus, N.; Reuven, R.; Cionea, C.; Hosemann, P.; Peterson, P.F. Development of engineering parameters for low pressure diffusion bonds of 316 SS tube-to-tube sheet joints for fhr heat exchangers. In Proceedings of the TMS 2016 145th Annual Meeting & Exhibition, Nashville, TN, USA, 14–18 February 2016; pp. 583–588.
4. Reuven, R.; Bolind, A.; Haneklaus, N.; Cionea, C.; Andreades, C.; Buster, G.; Hosemann, P.; Peterson, P. Ni Interlayer to Improve Low-Pressure Diffusion Bonding of 316L SS Press Fit Tube-to-Tubesheet Joints for Coiled Tube Gas Heaters. *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.* **2017**, *3*, 030913. [CrossRef]
5. Cook, G.O.; Sorensen, C.D. Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding. *J. Mater. Sci.* **2011**, *46*, 5305–5323. [CrossRef]
6. Gale, W.F.; Butts, D.A. Transient liquid phase bonding. *Sci. Technol. Weld. Join.* **2004**, *9*, 283–300. [CrossRef]
7. Shirzadi, A.A.; Assadi, H.; Wallach, E.R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films. *Surf. Interface Anal.* **2001**, *31*, 609–618. [CrossRef]
8. MacDonald, W.; Eagar, T. Transient liquid phase bonding. *Annu. Rev. Mater. Sci.* **1992**, *22*, 23–46. [CrossRef]
9. Cooke, K.O.; Richardson, A.; Khan, T.I.; Shar, M.A. High-Temperature Diffusion Bonding of Ti–6Al–4V and Super-Duplex Stainless Steel Using a Cu Interlayer Embedded with Alumina Nanoparticles. *J. Manuf. Mater. Process.* **2020**, *4*, 3. [CrossRef]
10. Akhtar, T.S.; Cooke, K.O.; Khan, T.I.; Shar, M.A. Nanoparticle Enhanced Eutectic Reaction during Diffusion Brazing of Aluminium to Magnesium. *Nanomaterials* **2019**, *9*, 370. [CrossRef] [PubMed]
11. Hu, A.; Janczak-Rusch, J.; Sano, T. Joining Technology Innovations at the Macro, Micro, and Nano Levels. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 3568. [CrossRef]
12. Chai, L.; Tassou, S.A. A review of printed circuit heat exchangers for helium and supercritical CO2 Brayton cycles. *Sci. Eng. Prog.* **2020**, *18*, 100543. [CrossRef]
13. Shirzadi, A.; Wallach, E. Analytical modelling of transient liquid phase (TLP) diffusion bonding when a temperature gradient is imposed. *Acta Mater.* **1999**, *47*, 3551–3560. [CrossRef]
14. Shirzadi, A.A.; Wallach, E.R. Metal Bonding. U.S. Patent 6,257,481 B1, 10 July 2001.
15. Shirzadi, A.A.; Wallach, E.R. Temperature gradient transient liquid phase diffusion bonding: A new method for joining advanced materials. *Sci. Technol. Weld. Join.* **1997**, *2*, 89–94. [CrossRef]
16. Habisch, S.; Böhme, M.; Peter, S.; Grund, T.; Mayr, P. The Effect of Interlayer Materials on the Joint Properties of Diffusion-Bonded Aluminium and Magnesium. *Metals* **2018**, *8*, 138. [CrossRef]
17. Chuvil'Deev, V.N.; Nokhrin, A.V.; Kopylov, V.I.; Boldin, M.S.; Vostokov, M.M.; Gryaznov, M.Y.; Tabachkova, N.Y.; Tryaev, P. Spark plasma sintering for high-speed diffusion bonding of the ultrafine-grained near-α Ti–5Al–2V alloy with high strength and corrosion resistance for nuclear engineering. *J. Mater. Sci.* **2019**, *54*, 14926–14949. [CrossRef]
18. Aroshas, R.; Rosenthal, I.; Stern, A.; Shmul, Z.; Kalabukhov, S.; Frage, N. Silicon Carbide Diffusion Bonding by Spark Plasma Sintering Silicon Carbide Diffusion Bonding by Spark Plasma Sintering. *Mater. Manuf. Process.* **2015**, *30*, 122–126. [CrossRef]
19. Yang, Z.; Hu, K.; Hu, D.; Han, C.; Tong, Y.; Yang, X.; Wei, F.; Zhang, J.; Shen, Y.; Chen, J.; et al. Diffusion bonding between TZM alloy and WRe alloy by spark plasma sintering. *J. Alloys Compd.* **2018**, *764*, 582–590. [CrossRef]
20. Song, T.F.; Jiang, X.S.; Shao, Z.Y.; Fang, Y.J.; Mo, D.F.; Zhu, D.G.; Zhu, M.H. Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V titanium alloy and AISI316L stainless steel using Cu/Nb multi-interlayer. *Vacuum* **2017**, *145*, 68–76. [CrossRef]

21. Sheng, G.M.; Huang, J.W.; Qin, B.; Zhou, B.; Qiu, S.Y.; Li, C. An experimental investigation of phase transformation superplastic diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *J. Mater. Sci.* **2005**, *40*, 6385–6390. [CrossRef]
22. Dai, G.Q.; Qu, W.Q.; Zhuang, H.S. Structure performance and diffusion mechanism of aluminum alloy heat pipe low tem-perature diffusion brazing joints. *Chin. J. Rare Met.* **2013**, *37*, 851.
23. Norajitra, P.; Aktaa, J.; Spatafora, L.; Basuki, W. Layer Composite. WO2014060070A1. 15 October 2012. Available online: https://patents.google.com/patent/WO2014060070A1/en (accessed on 14 January 2021).
24. Jiangtao, X.; Jinglong, L.; Fusheng, Z.; Zhongping, W. Pressurizing Device and Method for Vacuum Diffusion Welding Machine. CN100368135C. 2008. Available online: https://patents.google.com/patent/CN100368135C/en?oq=CN100368135C.+ (accessed on 14 January 2021).
25. Qin, B.; Sheng, G.; Zhou, B.; Huang, J.; Li, C.; Qiu, S. Diffusion welding of titanium alloy and stainless steel. *Chin. J. Nonferr. Metals* **2004**, *14*, 1545–1550.
26. Yuan, X.; Sheng, G.; Qin, B.; Huang, W.; Zhou, B. Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *Mater. Charact.* **2008**, *59*, 930–936. [CrossRef]
27. Huang, L.; Sheng, G.-M.; Li, J.; Huang, G.-J.; Yuan, X.-J. Partial transient-liquid-phase bonding of TiC cermet to stainless steel using impulse pressuring with Ti/Cu/Nb interlayer. *J. Cent. South. Univ.* **2018**, *25*, 1025–1032. [CrossRef]
28. Li, J.; Sheng, G. Diffusion Bonding of TiC Cermet to Stainless Steel Using Impulse Pressuring with Ti-Nb Interlayer. *Rare Met. Mater. Eng.* **2017**, *46*, 882–887.
29. Wang, F.-L.; Sheng, G.-M.; Deng, Y.-Q. Impulse pressuring diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel using pure Ni interlayer. *Rare Met.* **2014**, *35*, 331–336. [CrossRef]
30. Al Hazaa, A.; Haneklaus, N. Diffusion Bonding and Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Type 304 and 316 Austenitic Stainless Steel—A Review of Similar and Dissimilar Material Joints. *Metals* **2020**, *10*, 613. [CrossRef]
31. Yuan, X.; Sheng, G.; Tang, K. Effect of interlayer type on microstructure and mechanical property of impulse pressuring diffusion bonded joints in austenitic stainless steel to α titanium alloy. *Mater. Res. Innov.* **2013**, *17*, 186–189. [CrossRef]
32. Deng, Y.; Sheng, G.; Yin, L. Impulse Pressuring Diffusion Bonding of Titanium to Stainless Steel Using a Copper Interlayer. *Rare Met. Mater. Eng.* **2015**, *44*, 1041–1045.
33. Yuan, X.; Tang, K.; Deng, Y.; Luo, J.; Sheng, G. Impulse pressuring diffusion bonding of a copper alloy to a stainless steel with/without a pure nickel interlayer. *Mater. Des.* **2013**, *52*, 359–366. [CrossRef]
34. Yuan, X.-J.; Sheng, G.-M.; Luo, J.; Li, J. Microstructural characteristics of joint region during diffusion-brazing of magnesium alloy and stainless steel using pure copper interlayer. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China* **2013**, *23*, 599–604. [CrossRef]
35. Sharma, G.; Dwivedi, D.K. Impulse pressure-assisted diffusion bonding of ferritic stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2018**, *95*, 4293–4305. [CrossRef]
36. Sharma, G.; Tiwari, L.; Dwivedi, D.K. Impulse Pressure Assisted Diffusion Bonding of Low Carbon Steel Using Silver Interlayer. *Trans. Indian Inst. Met.* **2018**, *71*, 11–21. [CrossRef]
37. Sharma, G.; Dwivedi, D.K. Effect of pressure pulsation on bond interface characteristics of 409 ferritic stainless steel diffusion bonds. *Vacuum* **2017**, *146*, 152–158. [CrossRef]
38. Sharma, G.; Dwivedi, D.K. Study of metallurgical and mechanical properties of CSEF P92 steel di ff usion bonds developed using pressure pulsation. *J. Manuf. Process.* **2019**, *38*, 196–203. [CrossRef]
39. Sharma, G.; Kumar, D. Diffusion bonding of 304 austenitic stainless-steel using pressure pulses. *Mater. Today Proc.* **2020**. [CrossRef]
40. Ren, X.; Li, S.; Xiong, Z. Isostatic di ff usion bonding and post-solution treatment between Cr22Ni5Mo3MnSi and Cr30Ni7Mo3MnSi duplex stainless steels. *J. Manuf. Process.* **2018**, *34*, 215–224. [CrossRef]
41. Li, H.; Liu, H.; Yu, W.; Li, M. Fabrication of high strength bond of Ti-17 alloy using press bonding under a high bonding pressure. *Mater. Lett.* **2013**, *108*, 212–214. [CrossRef]
42. Han, J.; Sheng, G.M.; Zhou, X.L.; Sun, J.X. Pulse Pressuring Diffusion Bonding of Ti Alloy/Austenite Stainless Steel Processed by Surface Self-nanocrystallization. *ISIJ Int.* **2009**, *49*, 86–91. [CrossRef]

Технология процесса диффузионной сварки с циклически пульсирующими соединяющими усилиями

Абстракт: Диффузионная сварка - это процесс сварки в твердом состоянии, который характеризуется следующими технологическими параметрами: температурой, сжимающей силой и длительностью процесса. Обычно технологическое усилие применяется в виде статической нагрузки, а к поверхности образцов предъявляются высокие требования (низкая шероховатость, чистота). Целью данной работы было усовершенствовать необходимую технологию диффузионной сварки и, прежде всего, повысить качество соединений за счет использования циклически-пульсирующих соединяющих усилий, чтобы свести к минимуму время или специфические условия обработки поверхности, характерные для данного процесса. Для этого необходимо было разработать и изготовить соответствующую системную технологию. За основу системы взяли преобразованную концепцию/принцип оборудования для испытания материалов. В результате преобразованная система и преобразованный технологический процесс позволили сократить время процесса в 5-6 раз по сравнению со временем обычного соединения.

Ключевые слова: диффузионная сварка; вакуум; сварка в твердом состоянии; циклически пульсирующие соединяющие усилия

1. Введение

В отличие от других процессов соединения, при диффузионной сварке формирование соединения происходит в твердой фазе обрабатываемых деталей. Это означает, что отсутствует негативное влияние на работу компонентов или свойства материалов. Диффузионная сварка в определенных технических и материальных пределах подходит для соединения любой комбинации материалов одного и того же или разных типов.

Таким образом, этот процесс обладает определенной привлекательностью, которая также открывает большие возможности для применения в будущем, особенно для электротранспорта, например, для соединения разнородных материалов, таких как медь и алюминий, или одновременного соединения компонентов многослойных структур. За один процесс возможно соединить до 400 слоев фольги и более. При таких производственных требованиях другие процессы, такие как лазерное соединение, достигают своих пределов. Особенно это касается необходимого усилия зажима, которое требуется во время процесса и должно быть приложено равномерно и, прежде всего, на небольшом расстоянии от места соединения, чтобы избежать образования волн и неконтролируемых прожогов сварки. Данные дефекты можно практически полностью устранить с помощью процесса двумерного соединения, такого как

диффузионная сварка. С другой стороны, процесс диффузионной сварки дает возможность создавать самые разнообразные комбинации материалов, пригодные для различных применений, — комбинации материалов, которые вряд ли можно получить при использовании классических способов соединения. Например, соединения между алюминием и сталью, алюминием и медью или сталью и керамикой можно качественно выполнить только при использовании процесса, который работает при температуре ниже температуры плавления (T_s) материалов.

Однако недостатком диффузионной сварки в данном случае является сложная подготовка поверхности соединяемых деталей и длительное время соединения. Нередко время соединения составляет несколько минут, часов или даже дней. Результатом являются сравнительно высокие производственные затраты, если говорить об экономических аспектах процесса соединения.

Такие проблемы можно устранить, адаптировав конструкцию. С одной стороны, это относится к конструкции соединяемых компонентов, а также к адаптации системной технологии. Последнее стало предметом научно-исследовательского проекта (данное исследование финансировалось ФЕДЕРАЛЬНЫМ МИНИСТЕРСТВОМ ЭКОНОМИКИ И КЛИМАТА [исследовательский проект ZIM ZF4012633FH9] на основании постановления Германского Бундестага), который в сотрудничестве с компанией SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH предусматривал разработку нового типа системы соединения и испытания для процесса диффузионной сварки.

В рамках проекта существующую системную технологию преобразовали и доработали таким образом, чтобы она позволяла заметно сократить время соединения или технические усилия, необходимые для подготовки поверхности. В основе лежит использование динамического приложения соединительных усилий в области расширения.

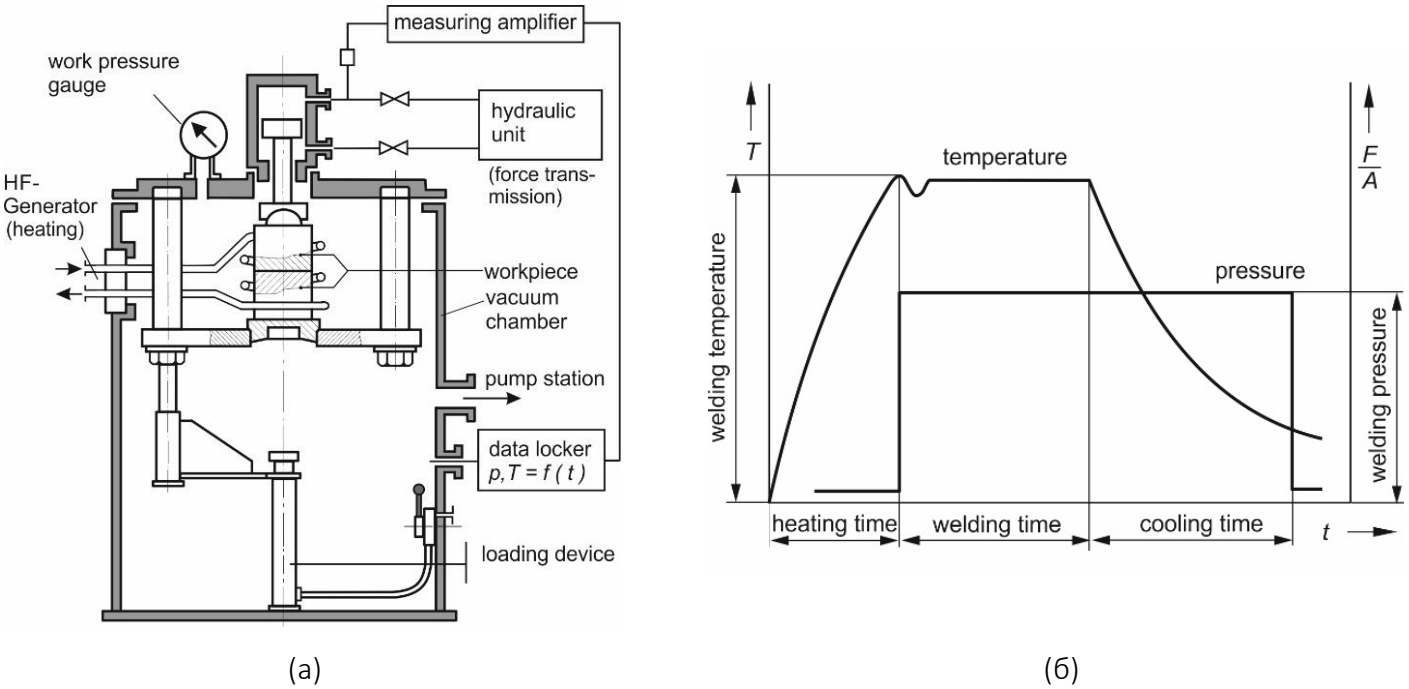
2. Уровень технологии

2.1. Основы диффузионной сварки

Соединение различных металлических или керамических материалов становится все более важным в применении технологий соединения. В связи с развитием электротранспорта и наличием различных типов носителей информации (литий-ионных аккумуляторов, топливных элементов и т.д.) сварка вновь приобретает все большее значение. Однако при смешивании различных материалов с помощью сварки всегда возникают дефекты (включения, интерметаллические фазы, невозможность соединения и т.д.). Это происходит в результате использования как классических дуговых процессов, так и при использовании лучевых процессов, таких как лазерная сварка или электронно-лучевая сварка. Таким образом, взгляд на технологию соединения поворачивается в сторону специальных процессов сварки, которые ранее использовались в особых случаях, а теперь становятся интересными для более

широкого круга задач соединения. Это также относится к диффузионной сварке, принципом процесса которой является сварка в твердом состоянии. Соединение создается диффузией при низких контактных давлениях и деформациях при температурах, превышающих температуру рекристаллизации [1].

Сам процесс соединения происходит посредством естественного физического процесса выравнивания разности концентраций между соединяемыми деталями [2]. Этот процесс происходит благодаря броуновскому движению без каких-либо внешних воздействий. В течение определенного периода времени в геометрии стыкуемых поверхностей соединяемых элементов под действием силы и температуры возникает ползучесть, в результате чего происходит сближение в диапазоне атомных расстояний, при этом происходит обмен или изменение расположения отдельных атомов соответствующих соединяемых элементов по всей поверхности стыкуемого края и, таким образом, создаётся уровень соединения/новая структура. Это происходит главным образом за счет приложения силы или давления и нагрева, а также за счет регулирования окружающей среды, осуществляемого в соответствующих камерах давления (реципиентах), в течение определенного периода времени. На рисунке 1 показан принцип диффузионного соединения.



(а) (б)

Рисунок 1. Схематическое изображение системы диффузионной сварки (а) и изменения температуры, и приложенного давления во время процесса (б) [1].

(а) work pressure gauge – датчик рабочего давления; HF-Generator (heating) – высокочастотный генератор (нагрев); measuring amplifier – измерительный усилитель; hydraulic unit – гидравлическое устройство; (force transmission) – передача усилия; workpiece – деталь; vacuum chamber – вакуумная камера; pump station – насосная станция (устройство); data locker – хранилище данных; loading device – устройство для нагружения

(б) welding temperature – температура сварки; heating time – время нагрева; welding time – время сварки; cooling time –время охлаждения; temperature – температура; pressure – давление; welding pressure – прижимное усилие (давление при сварке)

Таким образом, давление, время, температура и определённая атмосферная среда являются важными основными параметрами диффузионной сварки, которые позволяют соединяемым элементам соединяться ниже линии солидуса или эвтектической точки [3]. Их точное соответствие гарантирует высокую повторяемость результатов соединения.

Правильно подобранная температура процесса способствует диффузионным процессам в соединяемых материалах, но напрямую зависит от соединяемых материалов [4]. Таким образом, слишком высокие температуры сварки чреваты снижением коррозионной стойкости или ухудшением других механико–технологических свойств в результате микроструктурных изменений (например, изменения роста зерен). Осаждение легирующих компонентов (компонентов сплава) в определенных температурных диапазонах также играет решающую роль в данном случае, что также может влиять на механико–технические свойства готовых соединений. Например, температура сварки должна быть ниже температуры плавления (T_s) самого низкоплавкого соединяемого элемента. В зависимости от используемого материала, она обычно составляет от 0,52 x T_s до 0,88 x T_s [1,2,5]. Это определяет последующую прочность соединения.

Параллельно с этим сварка давлением создает контакт между соединяемыми поверхностями, причём он должен быть равномерным. При этом подготовка детали и поверхности играет решающую роль для успешного выполнения таких соединений. Таким образом, что касается плоскопараллельности, равномерности и чистоты (удаления посторонних слоев или посторонних веществ), требуется очень хорошая подготовка соединяемых поверхностей, поскольку, например, количество и размер пор, образующихся в местах соединения, напрямую зависят от шероховатости поверхности [4,6]. Поэтому соединяемые поверхности должны иметь металлический блеск благодаря соответствующим этапам механической обработки, таким как шлифовка, полировка, притирка и т.д. Средняя шероховатость (Ra) (на основе геометрических характеристик изделий [GPS] —Текстура поверхности: профиль —Часть 2: Термины, определения и параметры текстуры поверхности [ISO 21920-2:2021, исправленная версия 2022-06] [7]) также не должна превышать 0,5 µm - 1,5 µm для металлов, а также для стекла или керамики.

Давление и температура зависят друг от друга — чем выше статическое давление, тем более низкую температуру необходимо/можно выбрать [8,9]. Цель состоит в том, чтобы избежать чрезмерной пластической деформации компонентов. Также необходимо уделить особое внимание геометрии деталей и их возможному ограниченному сопротивлению давлению из-за сложной или филигранной

конструкции. Поэтому при проектировании соединяемых деталей необходимо стремиться к созданию идентичных по контуру, самоцентрирующихся и, прежде всего, параллельно-соединяющихся поверхностей с целью обеспечения равномерного распределения давления.

После этого соединяемые детали последовательно укладываются слоями в прижимное устройство. В дополнение к высоким требованиям к свойствам поверхности, необходимо выполнить точную обработку и укладку слоями. Затем в реципиенте разрежают среду либо до заданного значения вакуума, обычно около 10^{-6} мбар (0,1 Па), либо после достижения определенного разрежения может быть предусмотрена возможность заполнения реципиента защитным газом (часто аргоном, азотом или гелием). Создаваемая таким образом особая среда предотвращает образование новых оксидных слоев. При этом остаточное содержание кислорода в камере печи должно составлять менее 5 ч./млн. [10].

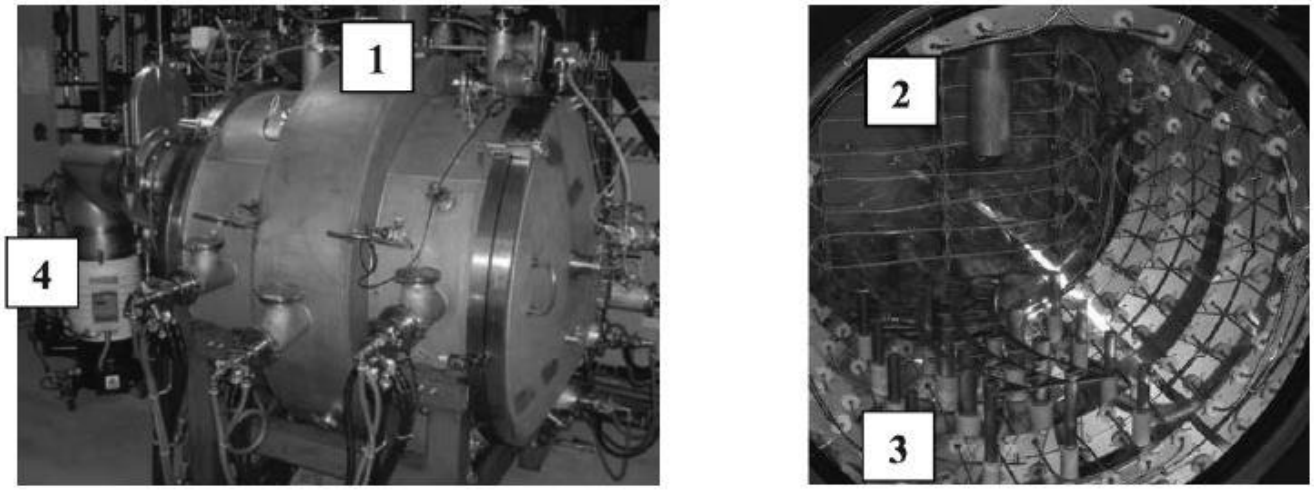
Кроме того, необходимо учитывать необходимое время для выполнения процесса. Помимо формирования соединения, сюда также входит расположение соединяемых материалов по отношению друг к другу, обеспечение атмосферных соединений, а также необходимая температура, разделенная на время нагрева, выдержки и охлаждения, а также применение необходимого усилия соединения/давления в зависимости от типа системы, типа среды и добавляемых материалов. Соответствующий процесс схематично показан на рисунке 1 (б) и, в зависимости от конструкции, может занимать несколько минут, часов или даже дней. Однако его можно улучшить, изменив другие основные параметры.

В этих условиях возможно соединение металлических материалов одного типа, а также разнородных металлических материалов напрямую или посредством промежуточных слоёв [2,8,11–13]. В принципе, данный процесс можно использовать для сварки практически всех “других материалов и большого количества комбинаций материалов [...]” [1], то есть также керамики, стекла и/или деталей, изготовленных методом порошковой металлургии. Однако параметры, которые необходимо установить для времени, давления и температуры, основаны только на эмпирических значениях.

2.2 Конструкция реципиента

В дополнение к усилию (давлению)/ времени и температуре деталей для процесса соединения, диффузионная сварка также использует преимущества изменения атмосферных условий. Главным образом, процесс соединения обычно происходит в условиях вакуума и, следовательно, к сварочной камере предъявляются чёткие требования. Эти камеры или системы, также называемые реципиентами, сами по себе являются очень сложными техническими конструкциями — см. рисунок 2. Важным

моментом при осуществлении их технического проектирования является физический размер [14]. Видимо, имеет смысл проектировать размер реципиента в зависимости от размера будущего изделия.



(а) (б)

Рисунок 2. Возможная конструкция камеры для диффузионной сварки — (а) комбинация вакуумной камеры с прижимными поршнями, которые создают необходимые усилия; (б) загрузочные опоры позволяют разместить сварной образец [10]. Условные обозначения: прижимное устройство (1); соответствующие прижимные поршни (2); загрузочные опоры (3); вакуумный насос (4).

В дополнение к созданию высокого вакуума (10^{-3} мбар ≤ p ≤ 10^{-8} мбар) внутри реципиента, необходимо также за счёт этого обеспечить создание или применение усилия. Прежде всего, необходимо обратить внимание на метод приложения усилия/применения. Это возможно осуществить двумя способами - статическим и динамическим. Гидравлические, пневматические, электрические и механические способы воздействия упоминаются здесь в качестве примеров, создающих усилия [15]. Модули, генерирующие усилие, могут быть установлены либо внутри реципиента - для этого требуется соответствующий размер камеры, — либо приложение усилия осуществляется извне и передается внутрь реципиента посредством соответствующих цилиндров. В данном случае реципиент можно сделать компактнее, при этом огромное значение имеет герметизация внутренней части камеры от воздействия внешней атмосферы посредством цилиндров. Это означает, что реципиент должен быть герметичным, но в то же время у цилиндров должна быть возможность перемещаться для создания необходимых технологических условий.

Помимо этого, для процесса сварки требуется определенное количество тепловой энергии для достижения определенных температур соединения. Это достигается либо с помощью теплового излучения, либо с помощью индукции — в этом случае соответствующие системы также встроены в камеры и регулируются с помощью системного управления.

Что касается свариваемости компонентов, то особенностью компонентов/деталей является то, что их возможно соединить в условиях заданного материала, конструкции и производственных условий таким образом, чтобы удовлетворить требуемые эксплуатационные характеристики [16]. Таким образом, можно видеть, что изменения в процессе могут также повлечь за собой изменения в конструкции или используемых материалах. И наоборот, если при диффузионной сварке с определенными материалами требуется улучшить результат сварки, конструкцию можно или необходимо изменить.

С одной стороны, это относится к конструкции соединяемых компонентов, а также к адаптации системной технологии. Последнее является предметом данного научно-исследовательского проекта, направленного на разработку нового типа системы соединения и испытания для процесса диффузионной сварки в сотрудничестве с компанией SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH.

2.3. Выводы, вытекающие из уровня техники и поставленных целей

Использование процессов соединения всегда зависит от добавляемых материалов и соответствующей конструкции соединения, а именно от расположения компонентов относительно друг друга. Однако временной аспект также играет важную роль в промышленном подходе к использованию различных процессов, которые не следует недооценивать. В этом и заключается сложность диффузионной сварки. Если возможно связать время сварки с определенными критериями качества процесса соединения и, таким образом, заметно сократить его, это позволяет повысить экономическую выгоду и, следовательно, расширить использование данного процесса соединения. Чтобы реализовать это, необходимо внести два соответствующих изменения в используемую на сегодняшний день системную технологию.

С одной стороны, нагрев компонентов должен происходить независимо от окружающей среды с помощью индукции и, таким образом, значительно сокращать временные требования. Кроме того, существует идея использования создания силы давления с наложенной частотой, что позволяет либо снизить требования к подготовке поверхности компонентов при постоянной температуре и времени сварки, либо, с другой стороны, значительно сократить время процесса за счет применения метода принудительного соединения поверхностей благодаря применению силы давления с наложенной частотой.

Идея использования регулируемой частоты наложения пороговой силы при диффузионной сварке приводит к трём ожидаемым результатам:

1. Сокращение работ по механической обработке при предварительном соединении поверхностей.

Таким образом, устраняются пластические деформации в диапазоне пороговых значений давления и лучше компенсируются неровности поверхности. Это способствует атомарному сближению соединяемых поверхностей и снижает нагрузку на материал. В результате можно заметно сократить давление соединения, температуру соединения и/или время соединения.

2. Сокращение времени сварки вплоть до замены времени сварки критерием испытаний, основанном на частоте.

В то же время модифицированная система установки позволяет отслеживать и, в идеале, также уточнять характеристики соединения и, следовательно, управлять ими. В основе этого лежит предположение, что собственная частота и количество энергии, затрачиваемой на усилие соединения, а, следовательно, и жесткость системы, изменяются с увеличением площади соединения. Это можно определить и зафиксировать с помощью соответствующей измерительной технологии, разработанной компанией SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH и используемой в ее системах. Исходя из этого, можно описать критерий качества с учётом соединительной поверхности.

3. Настройка более подходящих/эффективных свойств материала за счет применения усилия с наложенной частотой и уменьшения толщины фаз.

В то же время, параметр "время соединения" должен быть приближен к реальной получаемой характеристике соединения, а не к эмпирическим значениям. С одной стороны, это снижает процент брака (из-за слишком короткого времени соединения и связанного с этим неполного или недостаточного сваривания), с другой стороны, время соединения можно сократить, поскольку процесс соединения можно завершить после завершения соединения.

Таким образом, концепция установки, рассматриваемая в исследовательском проекте, обладает следующими новыми характеристиками:

- испытание материалов и соединений в агрессивных средах посредством нейтральной атмосферы или вакуума;
- испытание материалов и компонентов в условиях эксплуатации, включая температуру приблизительно до 1000 °C, механические нагрузки в диапазоне сжатия и растяжения (статические и динамические), различные инертные окружающие среды;
- сокращение необходимых мероприятий по подготовке поверхности соединения за счет упрощенного приближения поверхностей друг к другу на атомарном уровне;
- соединение материалов в диапазоне пороговых значений давления (сварочное давление) до 100 кН при характерных частотах до 150 Гц и переменном количестве циклов нагрузки;

- повышение коэффициента частотного сдвига или контроля частоты для получения характеристик сварного соединения в процессе соединения без разрушения и определения времени соединения в соответствии с условиями процесса.

Эти преимущества, которые можно ожидать от модификации системной технологии, значительно повысят экономическую эффективность диффузионной сварки, что откроет новые области применения и инновации, например, в области производства топливных элементов, при проектировании катализаторов или теплообменников.

3.Экспериментальные методы

3.1. Концепция технической реализации

Целью проекта являлось интегрирование рабочей камеры нового типа для диффузионной сварки в существующую систему испытания и измерения. Следовательно, основное внимание в проекте было уделено концепции различных возможностей для реализации технических требований, а также конструктивное проектирование компонентов системы в соответствии с выбранным путём решения и обеспечение плавного взаимодействия компонентов друг с другом. Заключительным этапом стало техническое внедрение в производство и испытание системы в соответствии с выбранными спецификациями. Основой для этого послужили необходимые всесторонние исследования по теме диффузионной сварки и технологии процесса. На основе этого подготовили подробную спецификацию для рабочей камеры и ее интеграцию в существующую технологию установки.

Спецификацию составили и дополнили в соответствии с классификацией. Она содержит разделы, относящиеся только к предметной области технологии установки и используемому программному обеспечению, а также разделы, касающиеся технологической стороны проекта (конструкция рабочей камеры, управление вакуумом, конструкция индуктора и т.д.). Все возникшие интерфейсы разрабатывались/адаптировались в двустороннем порядке.

Технической основой для этого проекта и, следовательно, для улучшения диффузионной сварки является испытательная машина Power Swing фирмы SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH (Клаусталь-Целлерфельд, Германия); моторизованная резонансная испытательная машина для проведения испытаний на прочность при растяжении/сжатии, на изгиб и крутильных колебаниях.

3.2.Строение

3.2.1. Вакуумная камера—Реципиент

Одновременно с детальной разработкой технической функциональной схемы выполнили проектирование камеры давления (реципиента). Данный этап работы также основан на технических характеристиках концептуального описания и спецификации

машины и знаниях, полученных при использовании существующих систем диффузионной сварки и вакуумных камер [17-20]. Однако проблема при осуществлении данного исследовательского проекта заключалась в обеспечении газонепроницаемости и вакуумной безопасности внутри реципиента, несмотря на необходимость подключения внешних измерительных систем к его внутренней части, доступности для замены образца и передачи усилия на соединяемый элемент без демпфирования. Концепция, изготовление и испытание различных подходов к такой конструкции в сочетании с введением динамических сил в замкнутую систему заняли много времени. Это зачастую было связано с полным пересмотром подходов.

Возможности технической осуществимости разработанных спецификаций были подкреплены различными концепциями применения силы и обсуждались как внутри компании, так и с партнером по проекту, а также с ведущими производителями оборудования в области использования рабочих камер, пригодных для работы в вакууме. Основное внимание при оценке решений уделялось сбалансированному соотношению затрат и выгод. Были рассмотрены два окончательных варианта.

С одной стороны, применение усилия в замкнутой системе осуществлялось посредством шатуна. Для того чтобы рабочая камера оставалась закрытой/технически герметичной, один или несколько пластиковых уплотнителей, установленных одно за другим, охватывают стержень и, таким образом, отделяют внутреннюю часть от внешней. При этом рабочая камера и система генерации вибрации соединены друг с другом непрямым образом. В данном случае важно, чтобы пластиковые или эластомерные уплотнения были достаточно герметичными для защиты от вакуума, создаваемого в процессе. Эластомерные уплотнения в принципе газопроницаемы, однако их можно использовать для герметизации вакуумных камер. Например, фторкаучук характеризуется низкой газопроницаемостью для воздуха и может использоваться в качестве уплотнителя для вакуумных систем с рабочим давлением до $p = 1 \times 10^{-11}$ бар [21]. Эти уплотнительные материалы очень чувствительны к температуре и должны быть защищены от термических воздействий, возникающих в процессе эксплуатации. В результате механический корпус уплотнений спроектирован таким образом, что охлаждающая среда может подаваться через несколько внутренних охлаждающих каналов. Таким образом, обеспечивается оптимальная рабочая температура для уплотнений.

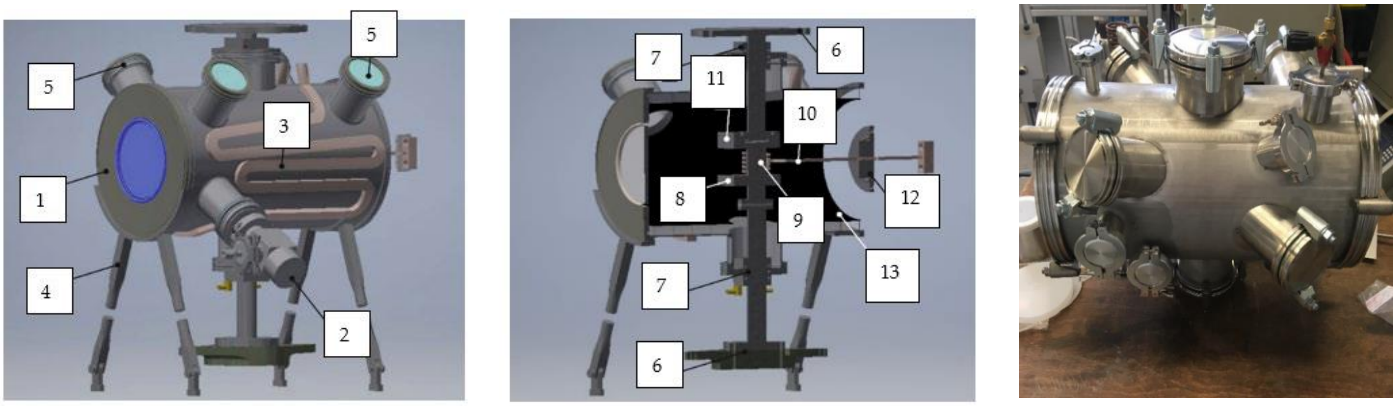
С другой стороны, был разработан альтернативный вариант применения усилия в замкнутой системе. В данном случае рабочая камера напрямую подключена к системе генерации вибрации, что позволяет реализовать закрытый блок. Компенсация перемещения или передачи вибрации внутрь рабочей камеры осуществляется с помощью так называемых металлических сильфонов для вакуума. Эти сильфоны представляют собой тонкостенные цилиндрические компоненты, внешняя поверхность

которых представляет собой волнообразную структуру, перпендикулярную оси цилиндра. Благодаря такой волнообразной структуре можно достигнуть высокая степень подвижности в осевом, в условиях исследовательского проекта, боковом и/или угловом направлении.

Исходя из вышеизложенного, критерием проектирования является ход поршня, необходимый для процесса, с одновременным учетом срока службы или возможных циклов нагружения сильфона. Это, в свою очередь, зависит от используемого материала сильфона, преобладающей температуры и давления в рабочей камере. Например, аустенитную нержавеющую сталь можно использовать для циклов с высокими нагрузками, но у неё ограничена термостойкость. Поскольку и высокие температуры (T ≤ 1000°C), и разреженное пространство являются основными компонентами процесса диффузионной сварки, оборудование или составные части должны соответствовать данным требованиям. Следовательно, конструкция и техпроцесс соответствовали данным требованиям.

У каждого решения есть своё конкретное применение. Однако окончательное решение приняли в пользу конструкции, предусматривающей использование нескольких эластомерных уплотнений. Это является хорошей отправной точкой для возможного последующего перехода системы от прототипа к серийному производству по показателю надежности и, конечно же, с учётом экономических факторов, таких как затраты на производство и обслуживание.

В целом, конструкцию реципиента пересмотрели и адаптировали на основе существующих систем, таких как система диффузионной сварки компании PVA LÖT-UND WERKSTOFFTECHNIK GmbH (Веттенберг, Германия) на кафедре сварочных технологий, и наряду с идеями из технических характеристик (например, конструкция с двойными стенками, сменный пуансон, специальный проходной канал индуктора). При этом разработанные конструктивные решения несколько раз разобрали и пересмотрели, прежде чем их реализовали в рамках технологии производства — см. рисунок 3.



(а) (б) (в)

Рисунок 3. Конструктивное исполнение реципиента. (а): Общий вид конструкции, включая отдельные внешние детали; (б): компоненты внутри вакуумной камеры; (в): окончательная производственно-

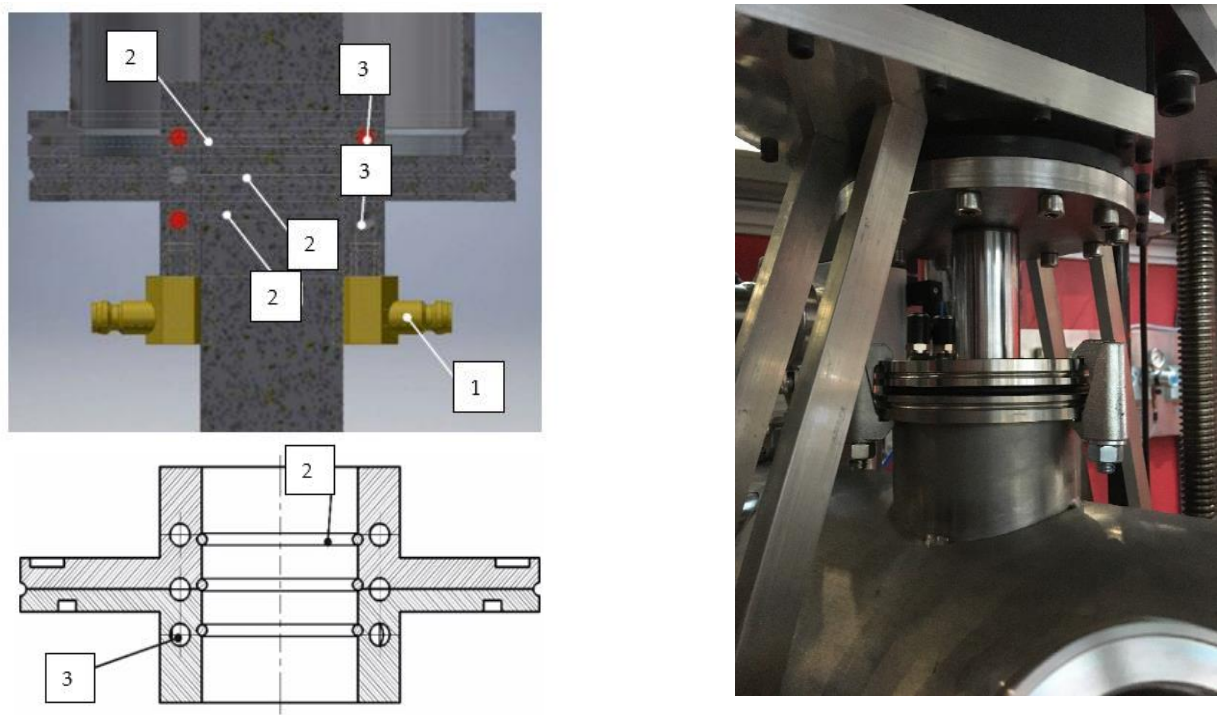
техническая реализация реципиента. Условные обозначения: доступ к рабочей камере, включая смотровое стекло(1), соединительный клапан для создания вакуума (2), система охлаждения (3), опоры для размещения реципиента в испытательной машине Power Swing MOT 100 kN Newline (4), дополнительные смотровые окна (5), соединительные элементы для передачи энергии между двумя системами (6), охлаждаемый проходной канал шатуна вкл. эластомерное уплотнение (7), нижняя ударная платформа (8), соединяемый элемент (9), индуктор (10), верхняя ударная платформа (11), проходной канал индуктора (12), тепловой экран (13).

В конструкции реципиента предполагалось использовать как можно больше стандартных компонентов при сборке, чтобы максимально сократить производственные затраты. Например, различные стандартные компоненты фирмы NOVOTEK VAKUUMTECHNIK GmbH (Магштадт, Германия) позволили реализовать данное решение. Основой для реципиента послужили детали прижимного фланца ISO-K в соответствии с DIN 28,404 [22], которые используются исключительно для вакуумплотных соединений от 1 x 10^{-9} мбар до 1,5 бар и используются в технологии низкого, среднего и высокого вакуума. Соединение этого типа состоит из двух фланцев ISO-K, центрирующего кольца с наружным кольцом вокруг уплотнительного кольца и зажимов. При сборке можно использовать прижимные винты, захваты или кольцевой фланец с пружинным кольцом и винтами. В зависимости от требований к вакууму уплотнение создаётся с помощью эластомерных уплотнений или металлического уплотнительного кольца из алюминия.

Эти элементы были герметично сварены с помощью сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG-сварка) и закрыты со стороны фланца так называемыми глухими фланцами ISO-K с помощью соответствующих прижимных винтов. В последующем процессе эти глухие фланцы служат в качестве проходного канала индуктора, а также в качестве дверц рабочей камеры или смотровых отверстий контроля процесса, поэтому они предварительно были подвергнуты различным механическим процессам, таким как сверление и/или фрезерование. Два из этих фланцев (рис. 3б, позиция 7) диаметром 100 мм расположены перпендикулярно основной части и на одном уровне друг с другом, благодаря чему можно разделить реципиент на верхнюю и нижнюю секции. Затем “фланцы ISO-K с муфтовым соединением”, как они официально называются, с подходящим наружным диаметром вставили в эти отверстия и также соединили с основной частью с помощью TIG-сварки.

В заключительном процессе шатуны для приложения усилия к камере проходят через них. Это также включает в себя интеграцию выбранных проходных каналов и вариантов соединения в замкнутую систему с помощью эластомерного уплотнения для шатуна. Конструктивное и итоговое исполнение эластомерного уплотнения в комбинации с шатунами показано на рисунке 4. На соответствующих концах шатунов расположены механические устройства сопряжения с системой Power Swing производства SINCOTEC

TEST SYSTEMS GmbH (Клаусталь-Целлерфельд, Германия) (рис. 4 (б), промежуточные пластины с соответствующим расположением отверстий.



(а) (б)

Рисунок 4. (а) Конструктивное эластомерного уплотнения. Соединение для подачи охлаждающей жидкости (1), эластомерные уплотнения в тройном исполнении (2), отверстия для охлаждения (3); (б) реализованный вариант, включая механическое устройство сопряжения с системой Power Swing.

На противоположном конце каждого шатуна расположены ударные платформы (рис. 5а), на которых деталь устанавливается по центру индуктора, а затем зажимается или прижимается при помощи направленных друг на друга шатунов. Эти платформы также привинчиваются к шатунам через соответствующие резьбовые отверстия. Положительным побочным эффектом такого типа конструкции является то, что форму и, прежде всего, расстояние между платформами можно изменять без особых усилий при изменении геометрии образца.



(а) (б) (в)

Рисунок 5. Установка катушки в реципиент — (а) вид внутри; (б) катушка, сфотографированная с разных сторон; (в) введение катушки в реципиент.

3.2.2. Система нагрева образцов

Еще одним ключевым элементом более поздней системы диффузионной сварки является система нагрева образцов в процессе сварки. Это достигается с помощью частотного генератора (MINAC 12/18; ток/выходная мощность 140 А/17 кВт; рабочая частота от 10 до 40 Гц) фирмы EFD INDUCTION GmbH (Фрайбург-им-Брайсгау, Германия), который позволяет нагревать компоненты до желаемой температуры в течение нескольких минут бесконтактно с помощью катушки индуктивности (индуктивность: 0,2 мкГн < L < 0,6 мкГн).

Пространственная среда вокруг катушки подвергается лишь минимальному косвенному воздействию, что является преимуществом для технологического процесса, но наиболее важно с точки зрения термостойкости эластомерных уплотнений. Однако необходимо критически относиться к тепловому излучению на стенки реципиента (теплозащитному экрану) или теплопроводности через пуансоны к уплотнениям. Это сводится к минимуму за счет определённого времени сварки и керамических изоляторов между пуансоном и нагретыми образцами.

Форма индуктора должна быть специально адаптирована к форме и размеру нагреваемого элемента, чтобы обеспечить эффективный нагрев [23,24]. Таким образом, форма катушки индуктивности точно соответствует размеру образца, определённому в исследовательском проекте, благодаря чему образцы располагаются в процессе производства таким образом, что зона их соединения точно соответствует геометрии катушки во всех трех измерениях. Сама катушка была изготовлена из медного квадратного профиля. Внутри этого профиля в последующем процессе протекает охлаждающая жидкость, которая регулирует температуру катушки и, таким образом, защищает катушку от перегрева. Охлаждающая жидкость подается через систему подачи охлаждающей воды генератора частоты.

Поскольку последующие процессы соединения будут происходить при определённых атмосферных условиях, рабочая зона катушки, которая пространственно отделена от генератора частоты, также должна была быть адаптирована. Это означает, что катушка должна была быть направлена внутрь реципиента с помощью соответствующей конструктивной адаптации, в то же время сохраняя атмосферные условия. Это достигается с помощью специального проходного канала. На этот проходной канал также распространяются точные технические требования. Он должен быть герметичным и обладать высоким тепловым сопротивлением, а при параллельном подключении не должен вызывать короткого замыкания между индуктором и генератором частоты. Это было достигнуто за счет использования

литьевого изоляционного материала (клея на основе эпоксидной смолы) и адаптации конструкции катушки в этой области. Сам проходной канал был выполнен из магнито-диэлектрического материала.

3.2.3. Управление системой

На основании разделения ответственности на “технологию производства” и “технологический блок” компания SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH пересмотрела существующую технологию установки, включая подготовку к интеграции рабочей камеры. Данный комплекс вопросов включал интеграцию управления/регулирования индукционной установки и управления созданием вакуума, необходимого для процесса, в алгоритм управления технологией производства. В то же время сотрудники SincoTec также предоставили специальные механические устройства сопряжения.

Перед началом процесса инженер-технолог должен определить, какие параметры будут использоваться для выполнения соединения. Можно выбрать различные параметры, такие как:

- С нагревом и без него;
- В вакууме или среде инертного газа;
- В зависимости от типа регулирования давления (по усилию или по расстоянию).

Это приводит к четырём различным сценариям программирования системы управления, каждый из которых имеет две подгруппы, связанные с типом регулирования давления, и они обобщены в таблице 1.

Таблица 1. Выбираемые сценарии процесса.

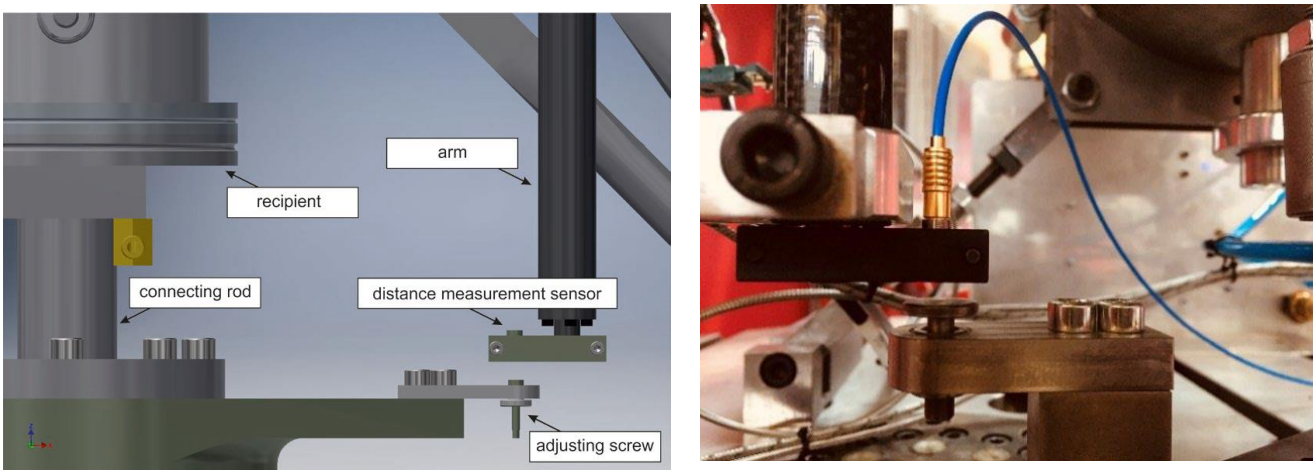
Описание 0= 1=	Нагрев без с	Среда вакуум защитный газ	Регулирование давления концентрация (регулируемая) движение (регулируемое)
сценарий A1	1	0	0
сценарий A2	1	0	1
сценарий B1	0	0	0
сценарий B2	0	0	1
сценарий C1	1	1	0
сценарий C2	1	1	1
сценарий D1	0	1	0
сценарий D2	0	1	1

Реализация этих сценариев достигается путём расширения системы управления в установке путём создания специальной подпрограммы под названием “диффузионная сварка” и добавления соответствующего программирования. С этой целью в существующую систему установки был интегрирован дополнительный модуль управления (SIMATIC S7-1200 производства Siemens [Мюнхен, Германия]), который был подключен к электросети и запрограммирован отделом сварочных технологий.

Прежде всего, тщательное смоделированное программирование системы управления и большее количество контрольных сварных швов в существующей системе позволили сократить время испытания новой системы в рамках проекта. Таким образом, выбранная система управления позволяет не только реализовать различные сценарии, но и регистрировать дополнительные метрологические параметры (например, измерения температуры с помощью термопар) через соответствующие аналоговые входы.

Аналогичным образом, при программировании установки и управлении процессом были составлены планы по адаптации необходимой измерительной технологии установки к новым задачам. Цель состояла в том, чтобы составить представление о процессе соединения в зависимости от различных свойств материала (например, модуля упругости, температуры плавления материалов и т.д.) с помощью демпфирования соединяемой поверхности или изменения частоты в диапазоне пороговых значений давления в процессе соединения при различных температурах. Необходимое для этого высокое разрешение системы измерения колебаний мощности позволяет регистрировать изменение демпфирования в диапазоне МВт или частоты в диапазоне 1/1000 Гц, что позволяет анализировать процесс соединения на месте.

Система измерения расстояния, выбранная для этой цели, по существу, состоит из двух поперечных балок и двух жестких кронштейнов — см. рисунок 6. К поперечным балкам присоединены реципиент или поршни. На кронштейнах установлены ёмкостные датчики расстояния с диапазоном измерения 0,2 мм, динамическим разрешением 4 нм и линейностью 0,2%. Это означает, что расстояние можно измерять относительно нижней траверсы. Однако эта высокоточная измерительная система также требует определённой последовательности в последующем процессе. Например, система измерения расстояния может быть настроена только после достижения нагрузки и температуры соединения, т.е. в качестве первого этапа процесса устанавливается статическая предварительная нагрузка, затем устанавливается температура соединения, затем настраивается датчик перемещения, и только после этого можно осуществлять процесс соединения. В противном случае диапазон измерений был бы постоянно превышен/занижен.



(а) (б)

Рисунок 6. Предполагаемое (а) и итоговое (б) размещение датчика расстояния, ёмкостного датчика (диапазон измерения: 0,2 мм; динамическое разрешение 4 нм).
(а) **recipient** – реципиент; **connecting rod** – шатун; **arm** - кронштейн; **distance measurement sensor** – датчик расстояния; **adjusting screw** - регулирующий винт

4. Результаты — Сравнительные выборки

В ходе проекта и реализации технологии производства всегда возникали моменты, когда принимаемые проектные решения необходимо было проверить, оценить и, при необходимости, отменить, чтобы усовершенствовать конечную установку на основе полученных знаний.

Таким образом, несколько раз обсуждался вопрос о целенаправленном воздействии динамических сил на замкнутые системы, и были протестированы отдельные варианты. Полученные преимущества/недостатки соответствующих решений в отношении их использования при диффузионной сварке также были учтены при планировании дальнейшей процедуры. В результате было принято решение в пользу варианта, который был отделён от реципиента с помощью эластомерных уплотнений.

Аналогичным образом, при сборке реципиента неоднократно проверялось качество сварных швов. После формирования всех сварных швов на реципиенте была проведена проверка на герметичность. Первым шагом было классическое испытание на водяной ванне [25] — полностью герметичный корпус погрузили в ёмкость с водой, наддули его сжатым воздухом и проверили, не образуются ли пузырьки и в каких местах. Обнаруженные дефекты были устранены с помощью технологии сварки. Затем реципиент подсоединяли к вакуумному насосу, и внутри него создавался вакуум. В зависимости от результатов испытаний сварные швы были профессионально обработаны и проверены ещё раз.

Кроме того, в ходе исследований было проверено взаимодействие системы Power Swing с реципиентом. Например, для этой цели реципиент с выбранными элементами был передан компании SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH на ранней стадии производства, чтобы проверить, все ли механические устройства сопряжения функционируют

совместно и не могут ли вибрации, создаваемые системой, оказать негативное воздействие на реципиента. В результате были внесены изменения только в опорные профили и систему измерения перемещения.

После завершения, возврата и установки обоих компонентов системы на кафедре сварочных технологий, началось испытание/проверка взаимодействия электрических устройств сопряжения между элементами управления системы (реципиент/система управления SincoTec), а также проверка отдельных этапов процесса — повышение давления, возбуждение вибрации, создание вакуума, нагрев с помощью индукции (рис. 7), а также выделение тепла с течением времени внутри устройства и т.д. Завершающая операция, в частности, имеет огромное значение с точки зрения герметичности системы и создания вакуума, необходимого для технологического процесса. В ходе испытаний с помощью установленных термодатчиков было показано, что область, в которой расположены уплотнения шатунов, которые также активно охлаждаются с помощью системы, не достигает температурного диапазона выше 100°C даже в течение более длительного периода времени (t > 20 мин). Этого вполне достаточно при продолжительности сварки менее 20 мин и термостойкости уплотнений T_{Grenz} = 150°C.

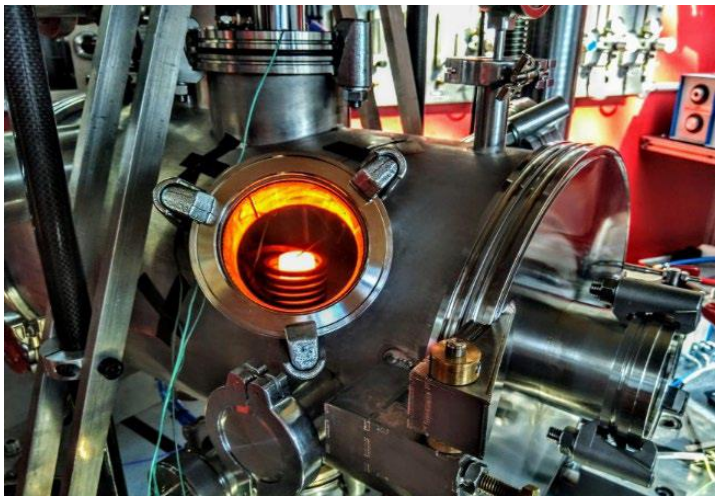
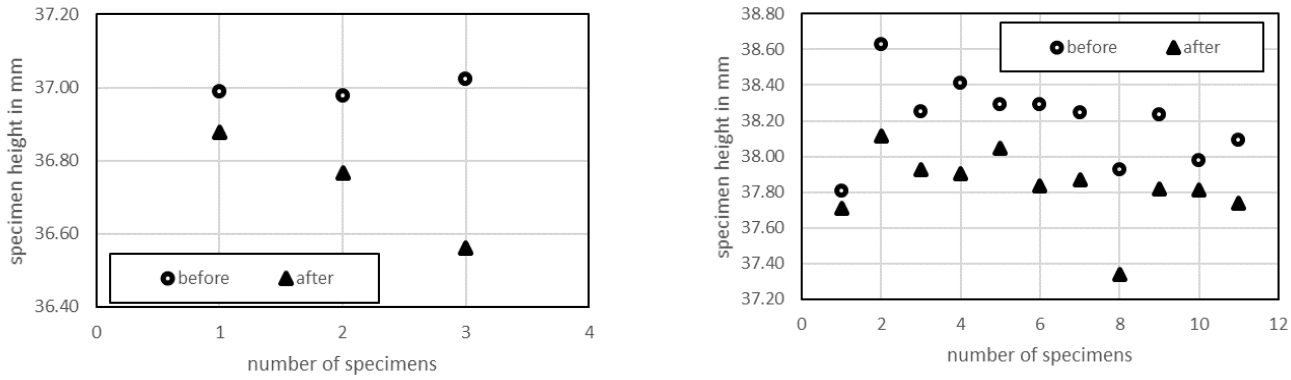


Рисунок 7. Исследование эффекта выделения/распространения тепла с течением времени в реципиенте в результате нагрева индуктивного компонента.

Параллельно с этим были проведены различные сварочные испытания с использованием системы диффузионной сварки компании PVA LÖT-UND WERKSTOFFTECHNIK GmbH, которая имеется на кафедре СВАРОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ХЕМНИЦА. Цель состояла в том, чтобы выполнить достаточное количество контрольных сварных швов, чтобы сравнить их с образцами, полученными на недавно разработанном оборудовании, и предоставить доказательства правильного функционирования новой концепции системы. Были записаны и проанализированы соответствующие данные, относящиеся к испытаниям при сварке, начиная с высоты деталей (рис. 8) перед соединением, температурного профиля и приложения требуемых усилий при соединении во время процесса и

заканчивая последующими металлографическими исследованиями для оценки области соединения. Трудносвариваемая сталь марки 1.7227 (42CrMoS4) (закалённая и отпущенная на время сталь с высокой вязкостью и прочностью, но которая очень трудно поддается сварке и поэтому не подходит для сварных конструкций) в основном используется в машиностроении, автомобилестроении [например, для изготовления зубчатых колес, шестерён и коленчатых валов] [26], и 1.0503 (C45) (нелегированная конструкционная сталь, которая не подходит для сварных конструкций из-за плохой свариваемости, так как при неконтролируемом охлаждении вызывает трещины под напряжением [27]) используется в качестве тестового материала для демонстрации возможностей диффузионной сварки. Эти образцы были заранее подготовлены по-разному. Например, были получены образцы, которые просто обточили по размеру и затем сварили, и были получены образцы, которые после обточки снова отшлифовали по размеру, чтобы получить однородную поверхность с шероховатостью Ra = 0,2 мкм. Последующий анализ образцов показывает, что технологический процесс на заводе PVA в принципе работает и что могут быть выполнены сварные соединения любого типа — одного типа (1.7227 + 1.7227 или 1.0503 + 1.0503) и/или разных типов (1.7227 + 1.0503). За один цикл процесса всегда создавалось три образца сварного шва. Однако при взгляде на необходимое время соединения и высоту образцов после соединения обнаруживается явный недостаток этой системной технологии.

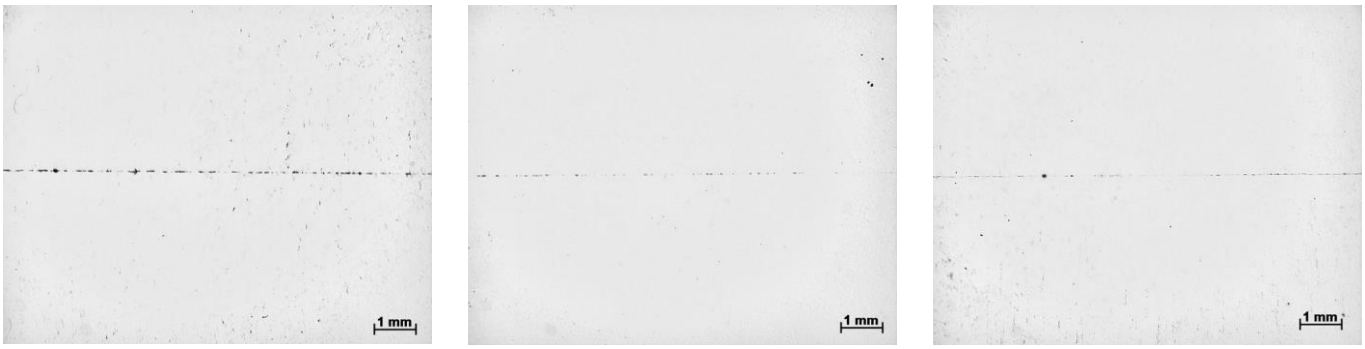


(а) (б)

Рисунок 8. (а) Сравнение высоты необработанных образцов до и после шлифования. (б) Сравнение высоты образцов до и после шлифования, Ra = 0,2 мкм, оба образца обработаны на заводе PVA LÖT- UND WERKSTOFFTECHNIK GmbH.

Время, необходимое для соединения отдельных компонентов, больше по сравнению с другими методами соединения. Для выбранной комбинации материалов 1.7227 + 1.0503 не рекомендуется использовать время соединения менее 60 минут. Это видно, например, на рисунке 9, где использовалось разное время обработки, а затем соединения были исследованы методом металлографии. Очевидно, что при продолжительности процесса ≤ 20 мин, а также при ≤ 40 мин область соединения все еще хорошо просматривается. Это не относится к времени обработки, превышающему 60 минут. Однако точный момент времени, в течение которого достигается

оптимальное соединение, может быть определён только с помощью большого количества испытаний с чёткой градацией времени процесса. Кроме того, это утверждение справедливо только для данной пары материалов и не может быть отнесено к другим.



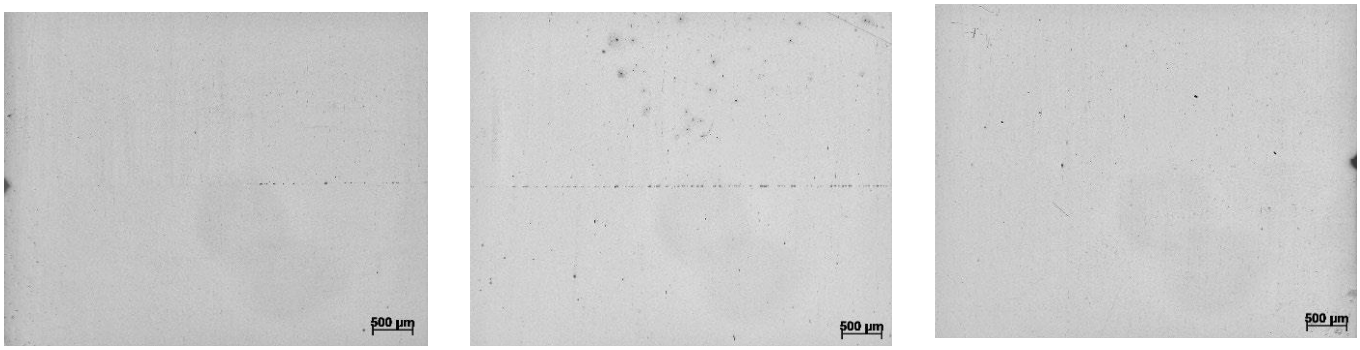
(а) (б) (в)

Рисунок 9. Поперечные микроснимки области соединения при диффузионной сварке 1.0503 + 1.0503, полученные на заводе PVA LÖT-UND WERKSTOFFTECHNIK GmbH — T_{weld} = 900 °C, F_{weld} = 12,5 кН (≙ давление на поверхности 10 Н/мм^2), время процесса: t_{weld} = 20 мин (а), t_{weld} = 40 мин (б), t_{weld} = 60 мин (в).

Также была определена высота образцов до и после процесса соединения. Это показало, что образцы до соединения, как правило, имели перепад высот относительно друг друга на 0,05 мм по всем образцам. После процесса соединения на заводе PVA LÖT-UND WERKSTOFFTECHNIK GmbH перепад высот между тремя образцами в ходе процесса увеличился более чем в 4 раза — см. также диаграммы на рисунке 8. Как и ожидалось, при меньшей общей высоте образцов после соединения между ними должен получиться аналогичный перепад высот. Таким образом, возникающее колебание может быть объяснено неточным распределением усилий в рамках существующей системной технологии. Это может привести к дефектам при соединении, которые зависят от расположения образцов в установке.

Первые сварочные испытания с использованием недавно разработанного реципиента в комбинации с системой Power Swing от SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH перкрывают действие старой системы, описанной выше, и позволяют применять технологию соединения в кратчайшие сроки при одновременной регистрации большого количества измерительных данных.

Кроме того, металлографические исследования также указывают на значительное сокращение времени соединения по сравнению со старой системой, которая использовалась ранее. Сопоставимые результаты можно достичь в 5-6 раз быстрее, чем при традиционном способе соединения, который использовался ранее — см. также рисунок 10. Металлографические исследования показывают такое же количество вновь образовавшихся переходов между соединяемыми элементами после 10-минутного процесса, как и в старой системе, которые появлялись только через 40 или 60 минут.



(а) (б) (в)

Рисунок 10. Поперечные микроснимки области соединения при диффузионной сварке 1.0503 + 1.0503, полученные на заводе SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH — T_{weld} = 900 °C, F_{weld} = 7 кН (≙ давление на поверхности 10 Н/мм^2), амплитуда вибрации: 1,5 кН, изменение нагрузки: 31 500, время процесса: t_{weld} = 10 мин, расположение микроснимка: левый (а) и правый (б) края или центр образца (в).

Записанные данные измерений также отражают полную последовательность процесса и, основываясь на характерных точках на кривых, позволяют интерпретировать состояние соединения или начальные точки, в непосредственной близости от которых целесообразно провести более тщательные исследования. В качестве примера, красная линия, изображённая на рисунке 11, показывает корреляцию между приложенной центральной нагрузкой, частотой вибрации и траекторией усадки. Это говорит о том, что в данный момент времени в процессе происходит усадка образцов — первая фаза пластификации происходит между пиками шероховатости поверхности. Такие моменты имеют решающее значение для разработки соответствующих критериев качества.

Таким образом, можно предположить, что реципиент, реализованный в рамках проекта “freqDiff” в сочетании с системой Power Swing от SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH, имеет общее рабочее состояние и, благодаря динамическому приложению усилий для соединения в области расширения, заметно сокращает как время соединения, так и требуемые технические усилия для подготовки поверхности при соединении деталей на большой площади.

Основная идея применения заключалась в том, что с увеличением площади соединения увеличивается собственная частота, а также количество энергии для приложения соединительного усилия и, следовательно, жесткость системы, которую определяет и фиксирует разработанная система измерения импульсов давления и системное программное обеспечение. Как и в [8,28,29] или [9], испытания сварки с нашей стороны с использованием недавно разработанной системной технологии также подтвердили это. Помимо сокращения времени соединения и минимизации усилий, необходимых для подготовки поверхности, данные измерений, записанные в процессе соединения, также были удивительными для нескольких сварных швов — см. рисунке 11.

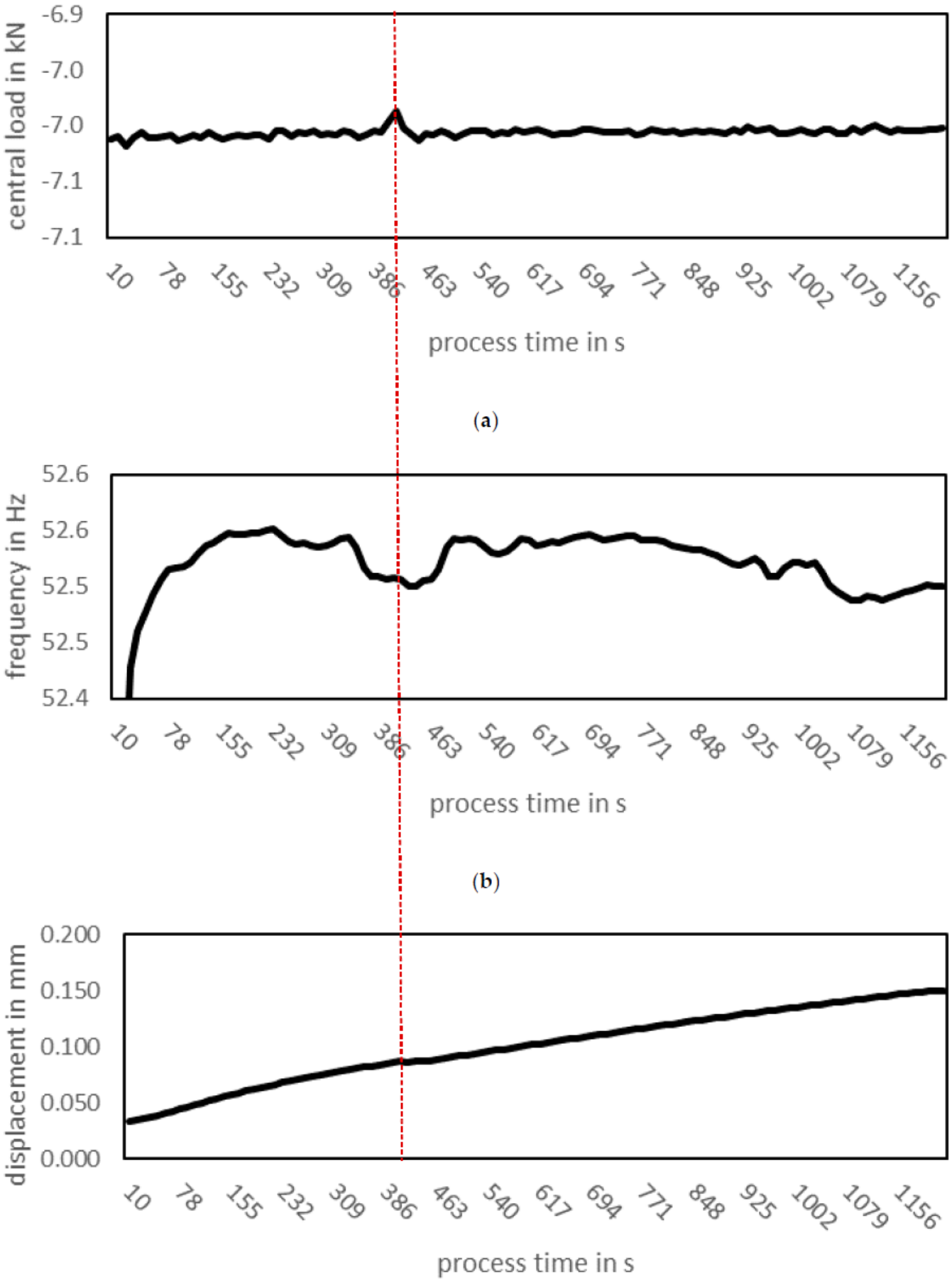


Рисунок 11. Пример зарегистрированных параметров (средняя нагрузка (a); частота вибрации (b); траектория усадки (c)) при диффузионной сварке 1,7227 + 1,0503, необработанная поверхность; T_{weld} = 900 °C, F_{weld} = 7 кН (≙ давление на поверхности 10 Н/мм^2), амплитуда вибрации: 1,5 кН, изменение нагрузки: 63 051, время процесса: t_{weld} = 20 минут — красная линия показывает соотношение между приложенной центральной нагрузкой, частотой вибрации и траекторией усадки.

Кроме того, при оценке кривых частоты вибрации и их сравнении становится заметным эффект, который, независимо от подготовки поверхности, возникает при продолжительности процесса приблизительно от 5 мин. (300 с) до 7 мин. (420 с). По-видимому, в этот момент частота колебаний затухает и впервые за все время процесса падает. Степень, в которой этот эффект связан с формированием соединения, и может ли он быть использован для разработки критерия качества таких сварных швов, или же этот эффект вообще не оказывает никакого влияния и является просто неточностью измерений, - все это может быть уточнено и проверено в ходе дальнейших исследований.

В заключение необходимо отметить, что все еще ведутся дискуссии о том, как зафиксированные переменные результатов сварки, полученные в результате измерения, могут быть преобразованы и обработаны в конкретные управляющие переменные для системы. Компания SINCOTEC TEST SYSTEMS GmbH и КАФЕДРА СВАРОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ стремятся работать в этом направлении и, таким образом, использовать потенциал, заложенный в технологии процесса диффузионной сварки, в сочетании с модификацией испытательного вибростенда для динамического приложения соединительных усилий в пороговом диапазоне.

5.Заключение

В заключение, проект “freqDiff — Разработка системы испытания и соединения с приложением усилия с наложенной частотой для сваривания материалов и их испытания с использованием новых критериев испытаний” можно считать успешным в качестве первого шага по совершенствованию процесса диффузионной сварки. Существующая системная технология была доработана таким образом, что позволяет заметно сократить время соединения при диффузионной сварке или уменьшить технические затраты, необходимые для подготовки поверхности образца, соединённого диффузионной сваркой.

По сравнению с первоначальным графиком проекта, сложность темы привела к тому, что потребовалось больше времени на техническую реализацию связанных инновационных идей. Поскольку конструкция реципиента была основана на определенных граничных условиях (газонепроницаемость/вакуумная безопасность; подключение внешних измерительных систем к внутренней части приемника; доступность для замены образцов, а также передача усилия на соединительный элемент без демпфирования), концепция, производство и испытание различных подходов к решению такой конструкции несколько раз изменялись, тестировались и пересматривались.

Техническая реализация системы в конце проекта и проведённые сварочные испытания демонстрируют общую функциональность системы, а также показывают значительное улучшение результатов соединения с точки зрения подготовки

компонентов и времени сварки. Это нашло отражение в нескольких тестовых испытаниях системы по сравнению с существующей системой диффузионной сварки. Однако на данный момент из-за собранных данных измерений пока невозможно определить конкретные критерии качества. Это означает, что еще не было окончательно выяснено, как зафиксированные переменные, полученные в результате измерения, связаны с результатом сварки и какие точные управляющие переменные могут быть получены для процесса и системы. Эти моменты определяют исследовательские цели обоих партнеров по проекту в дальнейших исследованиях.