

УДК 621.791

ВОЗМОЖНОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. ЛЮШИНСКИЙ

ООО «Авиационно-космические технологии»

Москва, Россия

UDC 621.791

POSSIBILITY OF DIFFUSION WELDING FOR JOINTED OF METALLIC AND NON-METALLIC MATERIALS

A. V. LIUSHINSKII

Аннотация. Рассмотрены возможности технологии диффузионной сварки для соединения материалов (металлов и неметаллов), используемых в различных отраслях промышленности. Показаны перспективы применения данной технологии соединения в твердой фазе.

Ключевые слова: диффузионная сварка, промежуточные слои, температура сварки, сварочное давление, разнородные материалы.

Abstract. To inspect the possibility of diffusion welding technology for joint of materials (metals and non-metals) to using at distinguish industries. To show the perspectives of application of this technology of solid state.

Keywords: diffusion welding, intermediate layers, temperature of welding, force of welding, heterogeneous materials.

Тенденция развития современных отраслей промышленности – атомной, энергетической, авиационно-космической, точного машиностроения и др. – характеризуется применением в прецизионных конструкциях большого количества металлических и неметаллических материалов. Поэтому основная проблема при сборке и производстве таких конструкций – обеспечить качественное соединение сборочных единиц и деталей, выполненных из разнородных материалов, в единый механизм, функционирующий в течение длительного периода эксплуатации.

Из-за металлургической несовместимости разнородных материалов сварка плавлением в большинстве случаев не может быть применена, а сварка металлов с неметаллами или композитами практически невозможна. Процесс пайки не всегда отвечает необходимым требованиям по прочности, герметичности, точности сборки.

Диффузионная сварка является одним из тех технологических процессов, которые могут решить множество задач, возникающих при изготовлении изделий, состоящих из разнородных материалов [1, 2].

Преимущество диффузионной сварки по отношению к другим технологиям

сварки заключается в том, что она обеспечивает качественное соединение материалов в твердом состоянии как в однородном, так и в разнородном сочетании. Диффузионная сварка за счет ряда отличий в протекании диффузионных процессов и возможности пластически деформировать приконтактные поверхности позволяет соединять детали и сборочные единицы из разнородных материалов в равнопрочные узлы гарантированного качества.

В работе приведены некоторые примеры применения технологии диффузионной сварки при соединении наиболее применяемых металлических и неметаллических материалов.

Все экспериментальные работы по диффузионной сварке различных материалов проводили на специализированной вакуумной установке СДВУ-50 с радиационным нагревом. Гарантированный вакуум – не хуже $1,33 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Металлографические исследования и механические испытания сварных образцов выполняли по стандартным методикам.

Титановые сплавы между собой соединяются диффузионной сваркой относительно легко. Обычно температуру сварки выбирают в диапазоне $800\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. в области температур рекристаллизации титановых сплавов. Учитывая низкий предел текучести титана и значительное влияние на него температуры, сварочное давление выбирают в диапазоне $0,1 \dots 1,0$ кгс/мм². Время сварки составляет от 5 до 30 мин, опять же в зависимости от выбранной температуры и сварочного давления.

Существующие трудности, которые возникают при разработке технологии диффузионной сварки деталей из титановых сплавов, связаны с неконтролируемыми структурными изменениями, протекающими в процессе сварки. Титановые сплавы характеризуются многообразием микроструктур и существенной зависимостью сопротивления деформации от их микроструктурного состояния в интервале температур « $800\text{ }^{\circ}\text{C} \div$ температура окончания $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ превращения». У сплавов с мелкозернистой равноосной структурой сопротивление высокотемпературной деформации значительно меньше по сравнению со сплавами с крупнозернистой пластинчатой структурой. Поэтому за счет регулирования исходной микроструктуры свариваемых образцов можно управлять параметрами режима диффузионной сварки, а значит, и качеством сварных соединений. Другими словами, механические свойства титановых сплавов особенно чувствительны к изменениям структуры, поэтому необходимо управлять этими изменениями или ограничивать их для получения высокой прочности и пластичности как самого сплава, так и сварного соединения. В частности, на примере сплава ОТ4 показано [1], что при диффузионной сварке титановых сплавов с исходной равноосной мелкозернистой (глобулярной) микроструктурой величина накопленной деформации свариваемых заготовок может быть снижена более, чем в 2 раза, если процесс сварки выполнять в интервале температур полиморфного

превращения (≈ 950 °С), при этом сварочное давление может быть использовано только на первом этапе для образования физического контакта площадью не менее 50 % от номинальной, а затем без давления производить изотермический отжиг для обеспечения развития объемного взаимодействия. Длительность отжига зависит от температуры, например, при температуре выше окончания полиморфного превращения (≈ 1000 °С) она сокращается почти в 10 раз по сравнению с отжигом при 950 °С.

Наблюдаемый эффект следует связывать не с величиной температуры, а в большей степени с развитием процессов диффузионного обмена при переходе через интервал полиморфного превращения, когда собственные внутренние напряжения будут достигать максимальных значений при минимальном сопротивлении сплава высокотемпературной деформации. Как следствие этого, наблюдается интенсивное смятие рельефов поверхности с увеличением зоны взаимодействия, что положительно сказывается на образовании соединения.

Большие сложности возникают при соединении титановых сплавов со сталями, например, со сталью 08X18H10T. Только применение промежуточного слоя на основе ультрадисперсного порошка никеля позволяет получать герметичные соединения с прочностью 50...60 кгс/мм² [2].

О роли промежуточных слоев при получении соединений диффузионной сваркой целесообразно остановиться отдельно. В качестве промежуточных слоев применяют, как правило, пластичные металлы – золото, серебро, никель, медь, алюминий и другие в виде фольги, проволоки, порошков, пленок, наносимых на соединяемые поверхности гальванически или в виде вакуумных конденсатов.

Технологически обоснованное применение промежуточных слоев при диффузионной сварке значительно расширяет возможности этого способа и номенклатуру свариваемых материалов, являясь, порой единственным или предпочтительным вариантом получения надежных соединений, отвечающих требуемым физико-механическим свойствам при конструировании изделий на основе разнородных материалов.

Промежуточные слои могут выполнять две главные функции при формировании соединения диффузионной сваркой:

- 1) снижение и, в ряде случаев, устранение химической неоднородности и термодинамической нестабильности в зоне соединения металлургически несовместимых материалов;

- 2) исключить или значительно уменьшить термодиффузионное воздействие на свариваемые материалы.

К первой группе относятся слои, предотвращающие непосредственное взаимодействие элементов соединяемых материалов, склонных к образованию в зоне взаимодействия интерметаллидов и хрупких фаз, а также снижающие напряжения в сварном шве из-за разницы в ТКЛР свариваемых материалов. Вторая группа включает слои, «помогающие» снизить температуру и сварочное

давление при сварке при одновременном обеспечении необходимых прочностных или иных свойств сварных соединений.

Накоплен определенный опыт применения в качестве промежуточного слоя ультрадисперсного порошка никеля, получаемого термическим разложением муравьинокислого или щавелевокислого никеля, и наносимого на свариваемые поверхности в виде пористой прокатанной ленты. Такие слои хорошо зарекомендовали при изготовлении магнитных систем (соединение постоянных магнитов с магнитопроводом и арматурой), бурового и специального инструмента (соединение твердых сплавов между собой и твердого сплава со сталями), деталей из жаропрочных сталей и др. Параметры промежуточного слоя: толщина – 65 мкм, пористость – 55 %.

Качество сварного соединения, получаемого через порошковый промежуточный слой, определяется в равной степени процессами, происходящими при спекании этого слоя и сопровождающими его припекание к поверхности основного (компактного) материала.

В процессе спекания постоянно уменьшается общая поверхность частиц порошка и увеличивается поверхность их соприкосновения. Сокращение общей поверхности приводит к уменьшению поверхностной и общей свободной энергии системы. Иными словами, движущей силой процесса спекания дисперсных порошков является снижение термодинамического потенциала системы. При этом, чем больше их начальная поверхностная энергия, тем значительнее движущая сила процессов спекания порошков и их припекания к свариваемым поверхностям.

При создании *навигационного оборудования* летательных аппаратов широко применяют приборы и устройства, принцип работы которых основан на использовании магнитных полей. Основным узлом таких приборов является магнитная система, выполненная из постоянного магнита, магнитопровода и арматуры.

Использование при диффузионной сварке постоянных магнитов типа ЮНДК, Fe–Nd–В со сталями 10880, 27КХ и др., промежуточного слоя в виде пористой ленты из ультрадисперсного порошка никеля, полученного термическим разложением формиатов или оксалатов никеля, обеспечило их соединение при температуре $T = 550$ °С и сварочном давлении $P = 2$ кгс/мм², т. е. ниже температуры Кюри и без макропластической деформации. При этом прочность составила не менее 30 кгс/мм² [2].

В *двигателестроении* остро стоит вопрос соединения жаропрочных сплавов между собой, т. к. не все эти сплавы успешно свариваются аргоно-дуговой сваркой или электронным лучом. А при необходимости соединить такой сплав с композитами типа TiNc или SiC диффузионная сварка незаменима.

Сварку образцов из сплава ВЖЛ-12 и стали 13X11H2B2MФ (ЭИ961) производили через никелевую фольгу НП-1 толщиной 0,5 и 0,1 мм. Параметры режима: $T_{св} = 1140$ °С, $P = 20$ МПа, $t = 20$ мин. После сварки остаточная пластическая деформация образцов из 13X11H2B2MФ составляла не более 7 %,

а образец из ВЖЛ-12 не имел пластической деформации.

Образцы подвергали термической обработке при $T = 530$ °С, а затем производили их механические испытания на разрыв. Прочность $\sigma_e > 670$ МПа и разрушение происходит по телу образца, а не по зоне соединения. Микроструктура зоны сварки внутренних дефектов не выявила.

В результате экспериментов по сварке сплава ЭП866 с композитом TiNC и их механическим испытаниям на разрыв при комнатной температуре выбран следующий режим: температура $T = 1050$ °С...1100 °С, сварочное давление $P = 1,5...2,0$ кгс/мм², время сварки – от 40 мин до 1 ч, скорости нагрева и охлаждения не превышали 10 °С /мин. При этом пластическая деформация образцов из композита отсутствует, а у образцов из ЭП866 составляет около 7 %. Прочность соединения (среднее значение) $\sigma_e = 100$ кгс/мм². Разрушение сварного соединения происходит по карбонитриду титана.

Соединение стекла С-48 с молибденовым сплавом ЦМ2А, производимого при $T = 800$ °С, $P = 1$ кгс/мм² и $t = 20$ мин, обеспечивает получение равнопрочного герметичного сварного шва с минимальными внутренними напряжениями, которые исчезают после проведения дополнительной термической обработки.

Для реализации разрабатываемых технологий диффузионной сварки разработано современное специализированное вакуумное оборудование с возможностью автоматизации задания и контроля основных параметров режима, а также для сварки крупногабаритных изделий.

Даже столь минимальное количество примеров о возможностях диффузионной сварки для соединения разнородных материалов показывает, что эта технология обладает потенциалом и перспективами для применения в производстве прецизионной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 312 с.

2. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.

E-mail: nilsvarka@yandex.ru.