**ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА**

**1. Сущность метода и основные области применения**

Диффузионная сварка входит в группу способов сварки давлением, при которых соединение проходит за счет пластической деформации микронеровностей на поверхности свариваемых заготовок при температуре ниже температуры плавления. Отличительной особенностью является применение повышенных температур при сравнительно небольшой остаточной деформации. Ее технологическая характеристика была предложена Н.Ф. Казаковым и принята Международным институтом сварки в следующей формулировке: «Диффузионная сварка материалов в твердом состоянии - это способ получения неразъемного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки или напряжения, действующих в течение цикла. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести. При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования. На практике подобная схема осуществима наиболее просто, поэтому очень широко распространена.

По другой схеме нагрузка и пластическая деформация обеспечиваются специальным устройством, перемещающимся в процессе сварки с контролируемой скоростью (см. рис. 1, б). Эту технологию называют диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования (ДСПД-процесс). Этот процесс осуществляют при напряжениях, как правило, превышающих предел текучести. Таким образом, скорость деформации £ задается приложенной нагрузкой Р и условиями, в которых она действует: прежде всего температурой Т и временем действия 1.

Промышленное применение. Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в приборостроительной и электронной промышленности при создании металлокерамических и катодных узлов, вакуум-плотных соединений из разнородных материалов, полупроводниковых приборов, при производстве штампов и т.п.

Рис. 1 Схема деформирования при диффузионной сварке:

1 - система погружения; 2 -система деформирования;

Н - нагреватель; Д-детали

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок деталей сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкономично. Особенно эффективно такое применение диффузионной сварки в опытном и мелкосерийном производстве.

Перспективно получение многослойных пустотелых конструкций типа панелей из титановых или алюминиевых сплавов с наполнителем сложной формы (гофры, соты, ребра и др.) методом совмещения диффузионной сварки и формообразования в режиме сверхпластичности.

**2. Основные параметры режима**

При сварке по схеме свободного деформирования основными параметрами процесса являются температура нагрева заготовок Т, 0С; сжимающее давление р, МПа; время сварки t, мин; давление в вакуумной камере рк. Па; в случае проведения процесса в другой среде - характеристика этой среды с позиции протекания окислительно-восстановительных реакций (тип и химический состав среды, точка росы, парциальное давление кислорода). Кроме того, к важным параметрам процесса относятся подготовка поверхности под сварку: чистота поверхности, ее шероховатость и волнистость.

При ДСПД-процессе главными параметрами являются: температура Т, скорость роста нагрузки Р, скорость деформирования к, время деформирования t (или степень накопленной деформации), время выдержки в режиме релаксации tрсл. Сопротивление деформированию Р в этом случае - зависимый параметр. Его величина регистрируются непосредственно в течение всего цикла сварки. Оба параметра могут быть использованы для контроля и управления качеством соединения.

Диффузионная сварка может проводиться в вакууме, нейтральных и восстановительных газах, жидких средах. Вакуум создает наилучшие условия для защиты нагретого металла и очистки свариваемых поверхностей от загрязнения. Однако в отдельных случаях особенности материала могут налагать определенные ограничения на применение вакуума или делать его вовсе невозможным. В большинстве случаев процесс диффузионной сварки ведется при давлении в вакуумной камере pк = 10-2... 10-3 Па. Использование более высокого вакуума оправдано, когда необходимо обеспечить высокую размерную точность изделия (уменьшение остаточной деформации заготовок) за счет соответствующего снижения температуры, давления и времени. Тугоплавкие металлы удается таким образом сваривать при температурах ниже порога рекристаллизации и тем самым избегать охрупчивания материала.

На ход диффузионной сварки существенно влияет парциальный состав остаточных газов в камере. Попадание в рабочую зону паров вакуумного масла приводит к увеличению парциальных давлений газов-окислителей (С02, Н3О) по сравнению с газами-восстановителями (СО, H2). Специальные меры (азотные ловушки, использование безмасляных средств откачки) улучшают условия ведения диффузионной сварки, особенно при понижен­ных температурах.

Широко применяют в качестве защитных сред инертные (аргон, гелий) и активные газы (водород, реже углекислый газ). Состав защитного газа подбирают исходя в первую очередь из химической активности системы металл-газ в условиях сварки.

Подготовка заготовок в общем случае может складываться из механической обработки, очистки от загрязнений и нанесения подслоев. Механическая обработка обеспечивает: возможно, более плотное начальное прилегание свариваемых заготовок; удаление с поверхности загрязненного слоя; повышение размерной точности готового изделия; возможность снижения температуры, давления и времени сварки с улучшением микрогеометрии поверхности.

С повышением чистоты обработки облегчается развитие второй стадии процесса.

Очистка поверхностей от загрязнений (следов жиров, масла, полировальной пасты) может проводиться растворителями (ацетон, спирт, четыреххлористый углерод и др.), путем нагрева и выдержки в вакуумной камере. В отдельных случаях применяют отжиг заготовок в среде водорода. Положительные результаты получают при обработке в растворах кислот H2S04, MCI с последующими промывкой и сушкой. При сварке изделий из некоторых сортов керамики после механической обработки заготовки отжигают с целью «залечивания» поверхностных дефектов. Для этого же проводят травление стекла в плавиковой кислоте.

**3. Рекомендации по выбору режима**

Для выбора температуры, давления и времени нет строгих рекомендаций. Высококачественные соединения можно получать, изменяя в определенных пределах значения каждого из этих параметров с соответствующей корректировкой других. При выборе их значений необходимо учитывать особенности свариваемых материалов и требования к изделию; возможность разупрочнения из-за роста зерна, ограничения по температуре нагрева и деформации изделия и т.п.

Температуру сварки обычно назначают в пределах (0,5...0,8)Тпл, для жаропрочных сплавов - несколько выше. При соединении разнородных материалов расчет ведется по температуре плавления наиболее легкоплавкого из них. В случае появления эвтектики температуру сварки выбирают ниже температуры ее плавления.

Скорости нагрева и охлаждения зависят от источника тепла и в большинстве случаев их не регламентируют. При сварке разнородных сочетаний материалов, термический коэффициент линейного расширения которых различается более чем на 2 • 10-6град-1, скорость охлаждения целесообразно уменьшать до 10…15 0С/мин.

Разгерметизацию камеры при сварке деталей из черных металлов рекомендуют проводить при температуре ≤120 °С, а для цветных и активных металлов - при 60 0С.

Время выдержки в зависимости от Т и р, допустимой остаточной деформации, чистоты обработки контактных поверхностей и деформационной способности материала может колебаться от нескольких секунд до нескольких часов (чаще 5... 10 мин).

Давление выбирают в диапазоне 0,8…0,9 предела текучести при температуре сварки. Для известных конструкционных материалов оно может изменяться в диапазоне 1 ...50 МПа. Для сварки тугоплавких и твердых материалов эти значения могут быть в несколько раз выше.

**4. Технологические возможности процесса**

Диффузионная сварка позволяет сваривать:

* большинство конструкционных материалов на металлической основе, ферриты, керамику, стекла, кварц, сапфир, графит, полупроводниковые материалы в однородном и разнородных сочетаниях;
* пористые, металлокерамические, композиционные материалы без нарушения их текстуры и ухудшения служебных свойств;
* при использовании соответствующих барьерных покрытий и проставок - разнородные металлы и сплавы, склонные к образова­нию хрупких фаз, тугоплавкие металлы (вольфрам, ниобий, тантал и др.) при температурах ниже порога рекристаллизации.

Диффузионная сварка дает возможность также избежать охрупчивания металла. С использованием промежуточных проставок можно также соединять материалы с резко отличными значениями коэффициентов термического расширения.

Диффузионной сваркой можно выполнять все типы соединений при самом разнообразном конструктивном их оформлении: встык, вскос, соединять пересекающиеся стержневые элементы между собой и с плоскими или криволинейными поверхностями; сваривать заготовки любых сечений; при применении местного нагрева и вакуума - соединять заготовки не­ограниченной длины; сваривать пленки, фольгу толщиной в несколько микрометров и достаточно массивные детали; осуществлять сварку при практически любой разнотолщинности заготовки.

После диффузионной сварки не нужна механическая обработка сварного шва, получаемые изделия обладают высокой размерной точностью (остаточные деформации в пределах 0,1...6 %); швы имеют высокие показатели механической прочности и пластичности на уровне основного материала.

При использовании этого метода создаются хорошие гигиенические условия на производстве.

К недостаткам метода следует отнести значительную длительность процесса, сложность оборудования, определенные трудности с загрузкой заготовок и выгрузкой готовых изделий из рабочей камеры при организации непрерывного процесса изготовления сварных изделий, требования достаточно высокой точности сборки и чистоты обработки свариваемых поверхностей, необходимость контроля температуры заготовки в зоне шва. Высокие требования к качеству контактных поверхностей удорожают процесс в целом.

**5. Разновидности способов сварки**

Диффузионная сварка с промежуточными прокладками. Промежуточные прокладки могут быть расплавляющимися и нерасплавляюшимися. Подслои на свариваемые поверхности наносят с целью:

* увеличения прочности сцепления (сваривания);
* предотвращения появления нежелательных фаз при сварке разнородных материалов (барьерные подслои);
* интенсификации стадии объемного взаимодействия;
* облегчения установления физического контакта по всей свариваемой поверхности за счет использования подслоев из пластичных материалов;

- снижения температуры и давления при сварке и, значит, уменьшения остаточных деформаций.

В зависимости от конкретной задачи выбирают материал подслоя. Чаще всего это никель, медь, серебро, золото. Толщина подслоя порядка 2. ..7 мкм.

Для предотвращения появления нежелательных, фаз (интерметаллидов, карбидов и т.д.) или во избежание обеднения одного из свариваемых материалов каким-либо легирующим элементом наносятся более толстые покрытия, служащие барьером. Эту задачу могут выполнять и прокладки из фольги.

Материал барьерной прокладки должен выбираться так, чтобы коэффициент его диффузии в основной материал был выше, чем для элементов основного металла в прокладку.

В случае сварки материалов на основе оксидов (керамики, стекла) наносимый металлический слой подвергают термической обработке с целью его окисления или облегчения диффузии в материал заготовки. При сварке кварцевого стекла с медью на стекло наносят слой меди с последующим ее окислением при температуре 800 0С в течение 3...5 мин до закиси. При сварке меди с оптической керамикой на основе сульфидов цинка применяют предварительное сульфидирование металла для повышения прочности сцепления.

В качестве расплавляющихся прокладок наиболее часто используют высокотемпературные припои. Их применение позволяет уменьшить давление сжатия и пластические деформации, облегчает удаление оксидных пленок, повышает эксплуатационные свойства соединений.

Диффузионная сварка с применением ударной нагрузки. Для предотвращения интерметаллидов в зоне сварного соединения помимо использования соответствующих промежуточных прокладок эффективен прием заметного сокращения времени сварки. На практике этот прием реализован так называемой «ударной сваркой в вакууме». Суть способа в том, что к локально нагретым зонам контакта детали «прикладывается» одиночный импульс силы со скоростью 1...30 м/с. В свариваемых деталях под воздействием динамической нагрузки происходят локальная пластическая деформация в зоне контакта и образование сварного соединения. Сварное соединение образуется за 1…10мс.

**6. Оборудование**

Наиболее широко применяют сварочные диффузионные вакуумные установки. В состав этих установок в общем случае входят рабочая вакуумная камера, механизм для создания сварочного давления, источник нагрева, вакуумная система, аппаратура управления и контроля. Конкретные установки (П-114, П-115, ДФ-101, УСДВ-630, ДСВ-901, УДС-ЗМ и др.) для диффузионной сварки могут иметь различное конструктивное оформление отдельных функциональных узлов и систем.

Рабочая вакуумная камера, в которой размещаются свариваемое изделие, нагреватели, механизм давления, выполняется обычно цилиндрической или прямоугольной формы из коррозионно-стойкой стали. Стенки водоохлаждаемые. Свариваемое изделие может располагаться на специальной опоре или в приспособлении. В большинстве случаев установка имеет одну камеру. Для увеличения производительности могут предусматриваться несколько камер с целью получения непрерывной загрузки и выгрузки заготовок и изделий (камеры шлюзования}.

Необходимая сварочная сила создается гидравлическим, пневматическим или механическим устройством. В отдельных случаях сжатие заготовок обеспечивается специальными приспособлениями, принцип действия которых основан на различии коэффициентов линейного расширения материалов свариваемых заготовок и охватывающих их элементов приспособления. Такие приспособления позволяют вести сварку в серийно выпускаемых вакуумных и водородных печах. Возможно использование «мягких» оболочек-камер. Сжатие заготовок происходит за счет перепада давлений внешней газовой среды и вакуумированного пространства. В большинстве же случаев в установках для диффузионной сварки используются гидравлические и механические системы.

Для нагрева заготовок наибольшее распространение получили индукционный, радиационный и контактный способы. Источником питания являются генераторы высокой частоты и трансформаторы. Нагрев током высокой частоты (ТВЧ) наиболее универсален и позволяет нагревать заготовки в разведенном состоянии (в отличие от контактного метода), что важно для интенсификации процесса очистки свариваемых поверхностей. Однако этот метод неприменим при сварке диэлектрических материалов: керамики, кварца, стекла. Для нагрева годятся тлеющий разряд, расфокусированный электронный луч, световое излучение.