

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

Алифанов А.В., Алехнович В.В., Голуб В.М.
ФТИ НАН Беларуси, г. Минск

Для получения высокопрочных биметаллических изделий из металлов с различающимися свойствами обычно применяют различные виды сварки: взрывом, электронно-лучевую и лазерную, сварку трением и т.д. Каждый из перечисленных видов сварки имеет свою область применения, что вызвано их специфическими особенностями.

Катоды, мишени из дорогостоящих и хрупких материалов, таких как гафний, тантал, хром, молибден, вольфрам, а также сплавов титан-алюминий и др. обычно изготавливают из двух частей. Верхняя, распыляемая часть катода, мишени изготавливается из вышеперечисленных металлов, а нижняя часть, охлаждаемая в процессе эксплуатации водой и служащая для механического крепления, изготавливается из меди, титана, алюминия, стали. Рабочая, распыляемая часть катода, мишени изготавливается методом постепенной, последовательной наплавки химически активного металла на медную водоохлаждаемую подложку в условиях вакуума или инертной атмосфере. Процесс нагрева и переплава металла осуществляется с помощью электронного луча, низкотемпературной плазмы. Выбранные режимы и условия плавки позволяют исключить всякое взаимодействие химически активного металла с материалом подложки и сохранить чистоту переплавляемого металла. Применение вакуумного переплава электронным лучом ограничивается высоким давлением пара над расплавом у ряда элементов. Поэтому переплав таких металлов, как магний, хром лучше осуществлять в среде аргона с помощью низкотемпературной плазмы.

Соединение верхней, распыляемой части с нижней охлаждаемой представляет собой достаточно сложную техническую проблему. Такое соединение должно удовлетворять ряду требований: обеспечивать прочное соединение частей составного катода, мишени, как при постоянной температуре, так и при наличии градиента температур, вызывающего высокие напряжения в области соединения распыляемой и крепежной частей катода, мишени; обеспечить хорошую теплопередачу через границу соединения; не должна нарушаться химическая чистота распыляемого металла; необходимо учитывать физико-химические особенности соединяемых материалов (у одних низкая, у других высокая температура плавления; химическая активность в нагретом состоянии, давление пара у соединяемых металлов и др.); процесс соединения должен быть максимально технологичен, прост в эксплуатации и требовать, как можно меньше времени на переналадку для изготовления различных типоразмеров катодов, мишеней.

Наиболее полно всем перечисленным выше требованиям отвечает процесс получения соединения сваркой давлением в условиях вакуума или защитной атмосфере. При использовании данного процесса можно получить прочностные характеристики соединения не ниже прочности более мягкого металла. При сварке давлением обеспечивается физический контакт по всей поверхности соприкосновения соединяемых материалов, что позволяет получить высокие показатели теплопроводности через границу соединения. Диффузионная сварка давлением в вакууме или среде инертного газа позволяет не только сохранить высокую химическую чистоту расплавленного металла, но даже несколько повысить химическую чистоту соединяемых металлов по растворенным газам за счет эффекта вакуумирования. В дополнение ко всему необходимо отметить простоту и технологичность данного метода соединения описанных выше материалов.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту процесса, механизм соединения при сварке давлением в действительности достаточно сложен и состоит из комплекса различных физических процессов: обеспечение максимально возможного физического контакта свариваемых поверхностей, ликвидации поверхностных окисных и адсорбированных пленок, активирование поверхностных слоев деформирования соединяемых материалов, объемных и поверхностных диффузионных процессов, рекристаллизации и т. д.

Реальная поверхность твердого тела, как бы тщательно она ни была обработана, имеет микронеровности и шероховатости. Даже при обработке поверхностей полированием остаются шероховатости размером $0,3 - 1$ мкм. В контактах двух металлических поверхностей действие межатомных сил притяжения начинается на расстояниях $1 \cdot 10^4$ мкм – $5 \cdot 10^4$ мкм. Следовательно, соприкосновение под давлением без заметных пластических деформаций позволяет проявляться атомному взаимодействию лишь в отдельных микровыступках. Во впадинах устанавливаются только адгезионные связи между металлом и газовыми или жидкостными молекулами адсорбционных наслоений, имеющих на поверхности металла. Для осуществления развитого схватывания, а в дальнейшем и сваривания, необходимо либо воздействие давления, при котором металл должен быть доведен до пластической деформации, либо нагрева. Оба процесса (пластическое деформирование и нагрев) создают такую общую концентрацию энергии в зоне соединения, которая, по определению академика П. А. Ребиндера, обеспечивает перестройку поверхностных слоев контактирующих твердых тел, а также более медленные вторичные процессы взаимной диффузии, рекристаллизации и другие процессы, которые протекают уже самопроизвольно и во всяком случае требуют значительно меньшей энергии, чем работа деформирования для образования площадок физического контакта твердых тел. Если процесс сварки давлением с нагревом осуществлять в вакууме, то поверхность металла будет не только предохраняться от дальнейшего загрязнения, например, окисления, но и очищаться от нежелательных включений в результате процессов десорбции, возгонки или диффузии вглубь соединяемых металлов.

Указанным способом можно достичь установления металлических связей по всей поверхности контакта. Надежность и прочность соединения возрастают, если зона соединения приобретает объемный характер. Расширение зоны соединения осуществляется в результате дальнейшего массопереноса – взаимной диффузии. В зависимости от температуры сварки диффузионные процессы влияют на рекристаллизацию и образование переходной зоны. При значительном отличии физических и химических свойств свариваемых материалов эта зона может являться зоной перестройки химических связей и состава. В ней может также происходить постепенное изменение типа и параметров кристаллических решеток и ряда физических свойств соединяемых материалов (от свойств, присущих одному из соединяемых материалов, до свойств, присущих другому). Но еще более эффективным и надежным способом повышения прочности соединения, особенно в случае использования металлов с резко отличающимися свойствами, является импульсная деформация с большой энергией, например, удар. В этом случае значительно активизируются приповерхностные атомы, что облегчает и ускоряет образование металлических связей, активизируются также диффузионные процессы, увеличивается объем протекания схватывания сварного соединения.

В данной работе был исследован процесс схватывания в условиях импульсной деформации, что позволило значительно упростить получение практически полного физического контакта соединяемых поверхностей, а также значительно увеличить степень их активации. Кроме того, исследовались различные промежуточные прослойки, применяемые с целью улучшения адгезионной совместимости соединяемых металлов с резко отличающимися свойствами. В работе использовался процесс вакуумирования для очистки свариваемых поверхностей от адсорбированных на них полярных и неполярных молекул органических веществ, воды, газа, окисленного слоя металла, а также электронно-лучевой локальный нагрев свариваемых поверхностей.

Сварка производилась на установке ударной диффузионной сварки оригинальной конструкции, созданной на базе установки вакуумного напыления УРМ 3279011 оснащенной резистивным нагревателем и электронно-лучевой пушкой с блоком управления (рис. 1).

Установка состоит из вакуумной камеры колпачного типа, устройства высокоскоростного нагружения, источника очистки и нагрева исследуемых образцов.

Получение разряда, необходимого для работы электроннооптической системы, осуществляется паромасляным диффузионным ВА-2-3пр. и механическим ротационным насосом НВР-5. Вакуумная камера с откачивающими агрегатами соединяется высоковакуумным затвором ДУ-200 и электромагнитными клапанами. Для замера разряда в вакуумной камере применяется термодатчик ЛТ-2 и ионизационная лампа ЛМ-2.

Для нагрева и активации поверхности исследуемых образцов использовали резистивный нагреватель, электронную пушку, тлеющий разряд.

Рисунок 1 Установка импульсной сварки давлением в вакууме

Для определения оптимальных температурных режимов сварки нами были созданы математические модели наиболее полно описывающие два случая нагрева соединяемых тел имеющих место при импульсной сварке давлением в вакууме.

В первом случае тел находящихся в контакте при боковом (радиальном) нагреве при условии минимальных тепловых потерь при нагреве в вакууме.

Во втором случае математическая модель отражает нагрев тел не находящихся в контакте (имеется зазор между свариваемыми телами) при нагреве торцевых поверхностей в зазоре электронным лучом (осевой нагрев).

С целью практической реализации решения поставленных задач по определению двумерных стационарных температурных полей были составлены компьютерные программы на языке ФОРТРАН-77.

Представлены также конкретные результаты расчетов распределения температуры при радиальном и осевом нагреве системы, состоящей из медного и титанового цилиндров. Радиусы цилиндров – 30 мм, длины – 10 мм, плотность теплового потока – 22 Вт/см^2 и 15 Вт/см^2 соответственно, коэффициент теплоотдачи – $105 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. Показаны также температурные профили в центральной плоскости цилиндров и линии изотерм на них. Как видно из рисунков 2-5 температурный градиент в области меди значительно меньше, чем у титана, и температурное поле в медном цилиндре практически постоянно. Это объясняется гораздо более высоким коэффициентом теплопроводности меди и соответствует практическим наблюдениям.

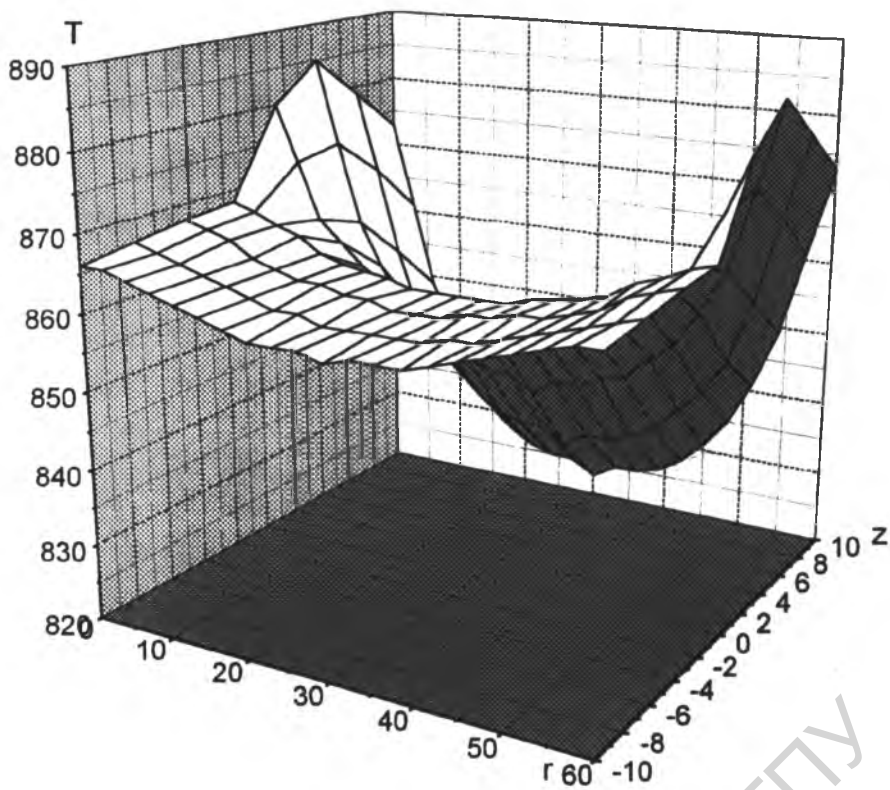


Рисунок 2 Температурный профиль в системе медь-титан при радиальном нагреве

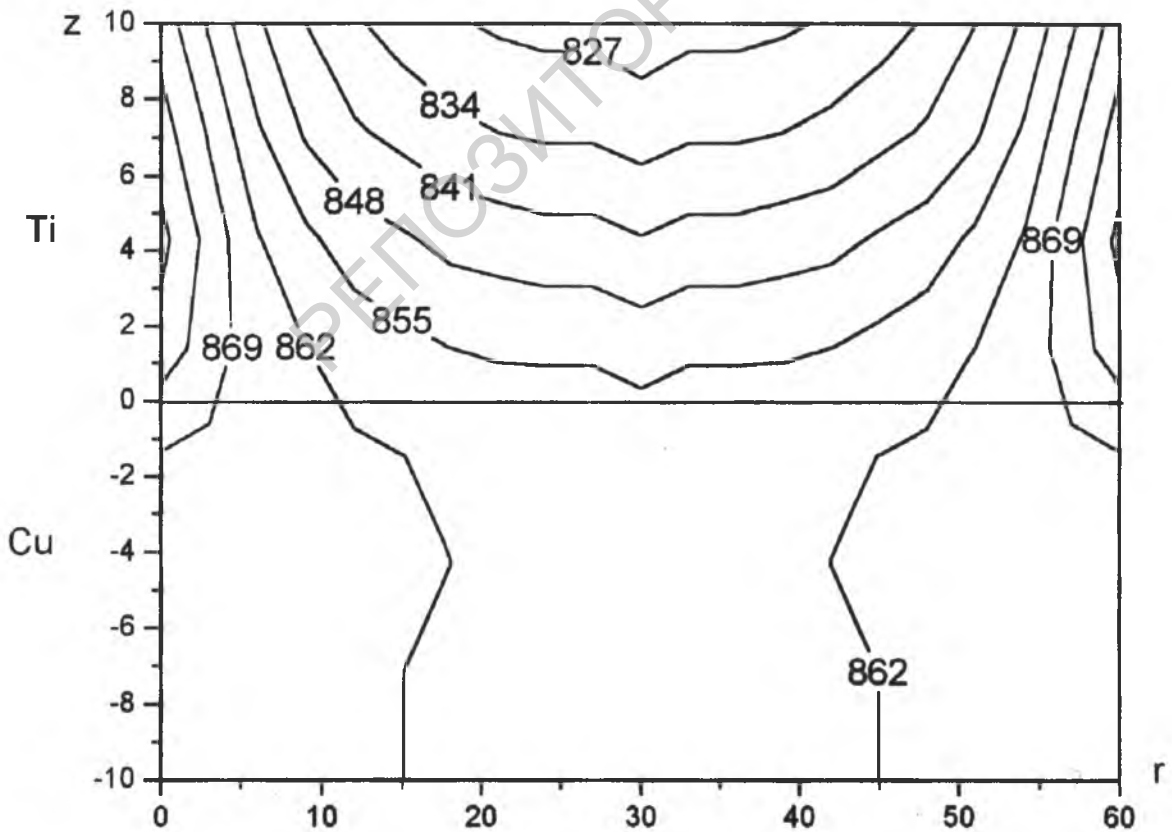


Рисунок 3 Распределение температуры в центральной плоскости системе медь-титан при радиальном нагреве

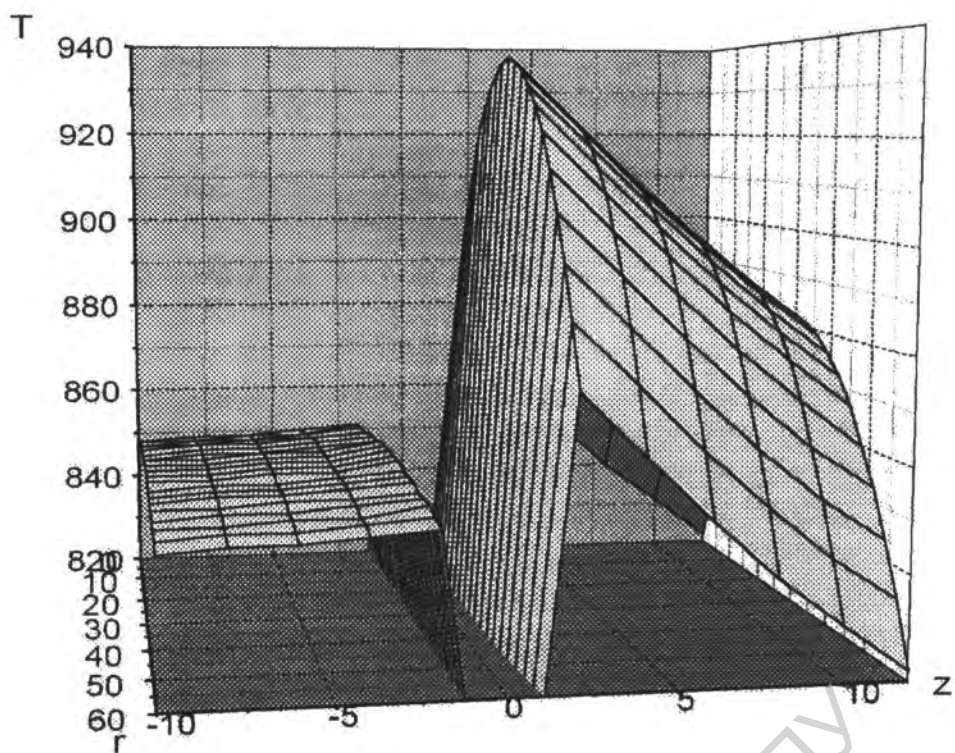


Рисунок 4 Температурный профиль в системе медь-титан при осевом нагреве

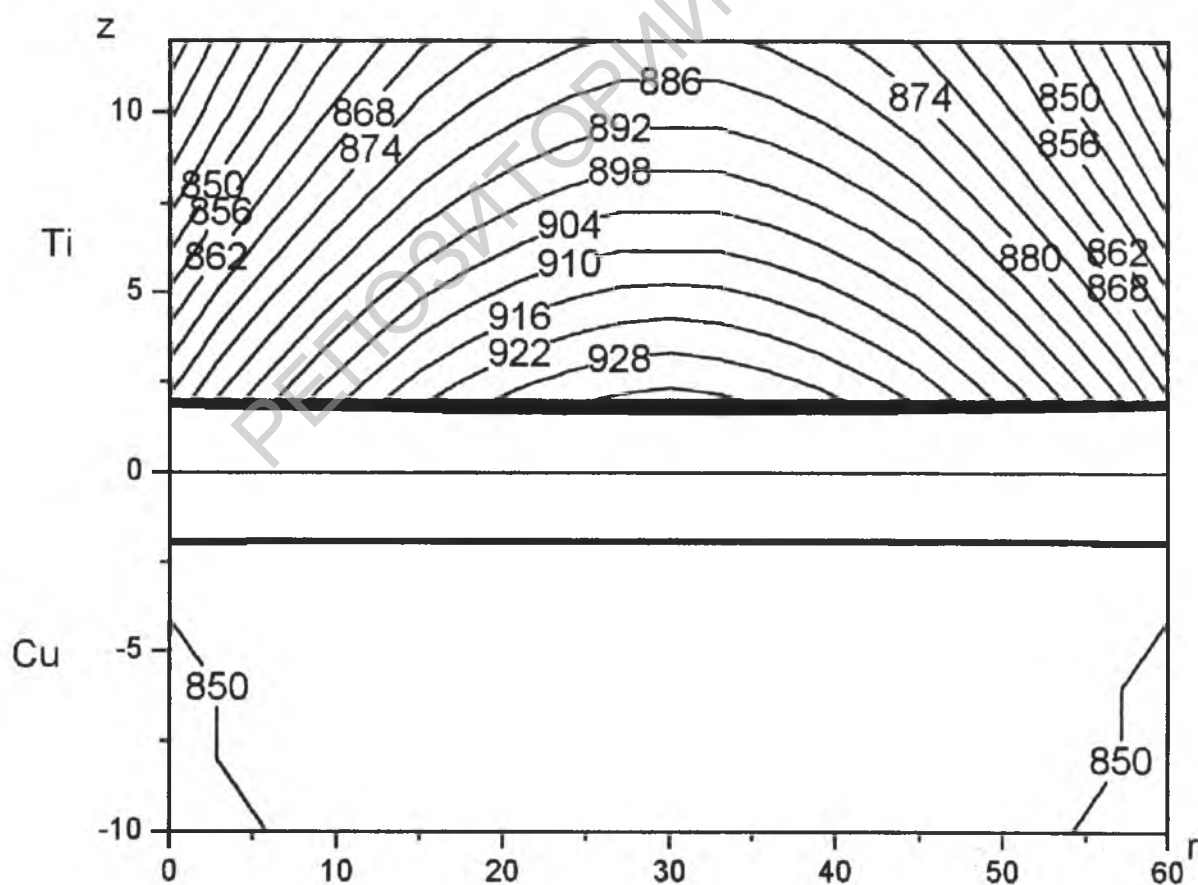


Рисунок 5 Распределение температуры в центральной плоскости системы медь-титан при осевом нагреве.

Данные математических расчетов позволяют оценить не только температуру нагрева в зависимости от мощности источника, но и от способа нагрева.

Сварку ударом с нагревом в вакууме можно характеризовать как процесс с высокой степенью локализации пластической деформации металла в зоне контакта. Все это приводит к резкому уменьшению длительности образования полного физического контакта и величины объемной пластической деформации.

Интенсивность процесса активации контактных поверхностей и образования межатомных связей (схватывания) зависит от частоты выхода дислокации в зону физического контакта, определяемой скоростью деформации, и суммарной площади активных центров на соединяемых поверхностях.

На процесс соединения металлов в твердой фазе решающее влияние оказывают величина сопротивления деформации свариваемых металлов и их релаксационные свойства, определяющие интенсивность процессов возврата. Поэтому любые технологические приемы, обеспечивающие уменьшение или предотвращение деформационного упрочнения металла в зоне соединения при сварке, позволяют резко сократить длительность образования качественного соединения, повысить воспроизводимость результатов, получать прецизионные соединения, снизить необходимые усилия и температуру сварки, рекомендовать строго определенные оптимальные параметры процесса.

В зависимости от особенностей свариваемых металлов процесс получения качественного соединения может быть завершен схватыванием контактных поверхностей, образованием в зоне соединения общих зерен или образованием новой фазы, свойства которой определяют свойства сварного соединения.

Для сочетания металлов, образующих по равновесной диаграмме состояния новые хрупкие фазы, не могут быть использованы способы сварки, предусматривающие длительное нахождение свариваемых металлов, таких как Ti, Zr, Mo, при высокой температуре (имеется в виду непосредственное соединение металлов без применения промежуточных прокладок). В этом случае необходимо использовать сварку с высокоинтенсивным силовым воздействием и относительно низкой температурой нагрева.

В сварных соединениях Ti-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu, полученных ударной сваркой в вакууме (УСВ), после отжига в области контакта наблюдается равномерный рост слоя интерметаллидов. Это, очевидно, обусловлено тем, что в процессе совместного деформирования методом УСВ успевают произойти процессы образования полного физического контакта, активации и схватывания контактных поверхностей. Поэтому можно предположить, что при УСВ имеет место повышенная диффузионная подвижность.

Резкое увеличение скорости диффузии, проявляющееся при импульсном нагружении металлов, обусловлено высокой подвижностью межузельных атомов, которые образуются в процессе пластической деформации. В

частности, при УСВ наблюдается массоперенос верхнего (метаемого) тела, значительно превышает диффузионную подвижность атомов в твердом состоянии. Высокая температура резко увеличивает концентрацию межузельных атомов свариваемых металлов, ускоряя тем самым «залечивание» дефектов.

При УСВ сочетаний разнородных металлов Ti-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu, Ti-Fe (железо армко) характерны отсутствие хрупких интерметаллидных фаз и наличие развитой зоны взаимодействия в виде твердого раствора (рис. 6-9).

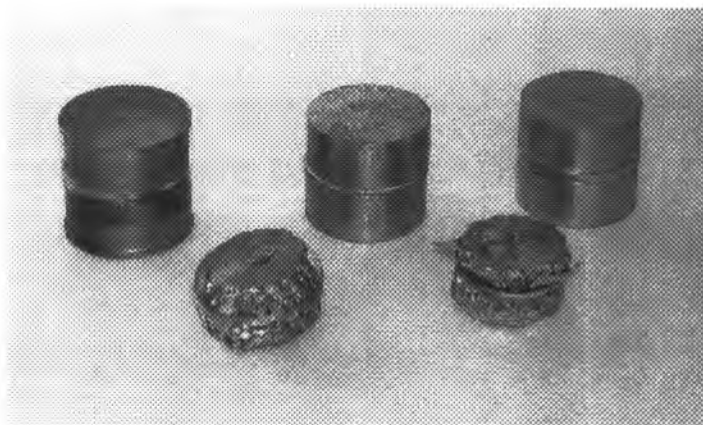


Рисунок 6 Образцы Ti-Cu, Ti-Mo-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu, сваренные методом УСВ

Рисунок 7 Сварная композиция Ti-Cu сваренная через промежуточную прослойку Mo. X200

Отсутствие хрупких интерметаллидных фаз в зоне контакта исследуемых соединений, наличие развитой зоны объемного взаимодействия— все это обеспечивает высокое качество сварных соединений, полученных УСВ. Действительно, прочность сварных соединений Ti-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu определяется прочностью Cu (рис. 9-10). Хорошая пластичность подтверждается испытанием на изгиб.

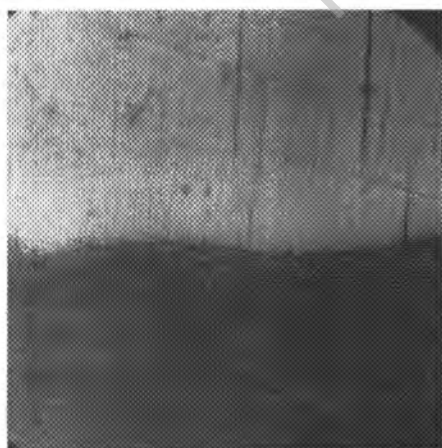


Рисунок 8 Сварная структура Ti-Cu. X200

Рисунок 9 Сварная структура Fe-Cu. X200

Технология сварки композиций Ti-Cu, Zr-Cu отработывалась на примере сварки конструкционной стали с медью, результаты которой приведены ниже. В твердом состоянии железо и медь имеют весьма незначительную взаимную растворимость. При температуре 1100° С растворимость железа в меди равна 5%, а меди в железе 8%. При нормальной температуре теоретическая растворимость меди равна 0,1%. Из диаграммы состояний видно, что жидкие медь и железо сплавляются, что приводит к образованию слитков, состоящих из двух зон: зоны, богатой медью, и зоны, богатой железом, а значительный температурный интервал затвердевания обуславливает появление ликвации.

Соединение меди со сталью осуществлено ударной диффузионной сваркой. Как видно из рис. 9, неповар отсутствует. В результате испытаний на растяжение разрушение образца происходило при нагрузке 35—36 кГ/мм² по меди вблизи места сварки (рис. 10). Результаты испытаний сварных образцов (сталь 10 - медь М1) приведены на рис. 10. Сварка производилась при T = 850° С и вакууме 5*10⁻³ мм рт. ст., разрушение образцов произошло по меди.

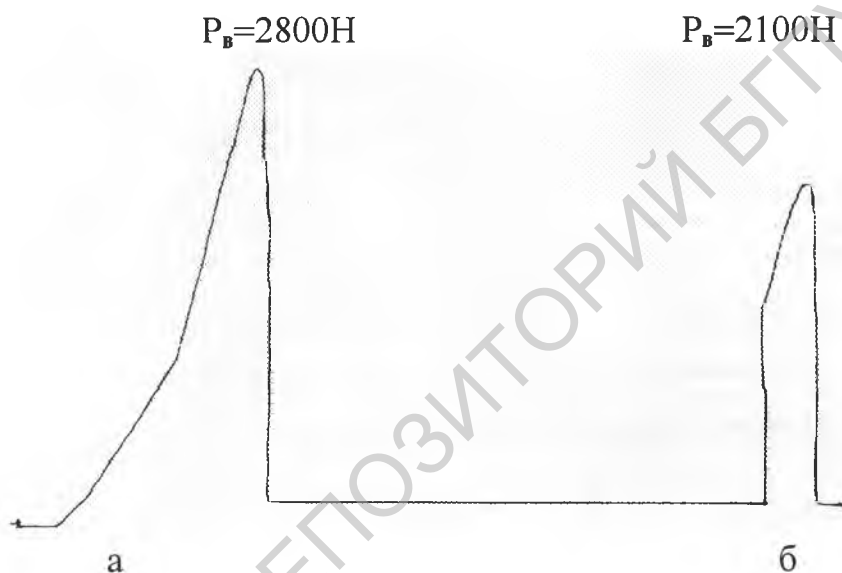


Рисунок 10 Диаграмма испытаний на разрыв образцов Fe-Cu диаметром 10мм сваренных при температурах 850 С (а) и 800 С (б)

В камере создавалось разрежение 5*10⁻³ мм рт. ст. Детали перед сваркой очищали следующим образом: медные детали после обработки резцом обезжиривали в трихлорэтилене, травили в 10%-ной H₂SO₄ в течение 1 мин и промывали в дистиллированной воде с применением ультразвука. Затем детали отжигали в водороде при температуре 820—830° С в течение 10 мин. Титановые детали также после обработки резцом обезжиривали в трихлорэтилене, травили с помощью ультразвука в смеси 2% HF + 50% HNO₃ + вода в течение 4 мин, промывали водой, спиртом и высушивали.

Выбор режима сварки производился следующим образом. Стяжку с закрепленными в ней соединяемыми деталями ставили в вакуумную камеру, нагревали до определенной температуры, выдерживали 1 мин, производили

удар и затем охлаждали. Были опробованы следующие температуры нагрева-800, 820, 830, 840, 850, 900° С.

Способность сварного шва сопротивляться механической обработке служит косвенной характеристикой качества сварки.

В результате был выбран режим сварки: выдержка при максимальной температуре 10 мин, температура 810° С. Величина разрушающей нагрузки при испытании на излом колеблется от 2,4 до 3,5 кГ/мм². При значении разрушающей нагрузки меньше 2,3 кГ/мм² сварное соединение дают низкий процент выхода при механической обработке.

Особенностью данной работы является использование тлеющего разряда в аргоново-гелиевой (гелий 5-7%) среде как для очистки поверхностей металла от перечисленных выше загрязнений. В процессе пластической деформации в области этих дефектов создается избыточная концентрация вакансий, обуславливающая ускорение диффузии. Создание неравновесных дефектов обуславливается тем, что при ударе положительного иона о свариваемую поверхность катода происходит сильный разогрев металла на очень малом участке, вызывающий испарение металла, но благодаря высокой теплопроводности медной составляющей биметаллического катода температура нагретого локального участка быстро падает из-за отвода тепла на массу.

Диффузионная сварка проводилась на образцах химически чистого циркония и технически чистого титана, химически чистого титана и технически чистого титана, химически чистого хрома и технически чистого титана, химически чистого алюминия и технически чистого титана. Поверхность свариваемых образцов составляла 1-2 см². Очистка проводилась тлеющим разрядом в аргоново-гелиевой смеси (5-7% гелия) остаточное давление в камере 10-30 Па. Время очистки подбиралось экспериментально и составило 5-10 минут. Образцы нагревались танталовым нагревателем до температур 900 - 1000°

ПУБЛИКАЦИИ

1. Изготовление составных катодов мишеней высокой чистоты с помощью высокоэнергетических источников и сварки давлением. Алифанов А.В., Алехнович В.В. // Материалы Технологии Инструмент: Третья Республиканская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии», Минск, 21-22 мая 1998 г. / АН РБ, Конференция «НОМОТЕХ-98», Секция 6.-Минск,1998.-Том3,№2,С.140.
2. Применение диффузионной сварки давлением для изготовления составных катодов, мишеней высокой чистоты. Алифанов А.В., Алехнович В.В.// Материалы и технологии-2000: Тезисы докладов 4-ая Республиканская научно-техническая конференция, Гомель,12-13 сентября 2000г. / НАН Б. Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого.- Гомель,2000.-С.46-47.
3. Электронно-лучевой переплав титана и циркония высокой чистоты. Алифанов А.В., Алехнович В.В., Алехнович В.Н., Лях А.А.// Материалы и технологии-2000: Тезисы докладов 4-ая Республиканская научно-техническая конференция, Гомель,12-13 сентября 2000г. / НАН Б. Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого.- Гомель,2000.- С.195
4. Расчет свойств промежуточных прослоек сложного химического состава, используемых в диффузионной сварке давлением с помощью ЭВМ. Алифанов А.В., Алехнович В.В. // Материалы и технологии-2000: Тезисы докладов 4-ая Республиканская научно-техническая конференция, Гомель,12-13 сентября 2000г. / НАН Б. Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого.-Гомель,2000.-С.142
5. Исследование процессов массопереноса на границе раздела биметаллических материалов при условии импульсного нагружения в вакууме. Отчет о НИР (заключ.) – ГНУ «ФТИ НАНБ», руководитель - А.В. Алифанов. - №ГР20007368.-Мн., 2003.-82 с.