

5. Бернштейн Д.Б., Лискин И.В. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применяемых материалов: Обзорн. информ. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1992. – 36 с.
6. Produkte [Electronic resource] / Rabe Agrarsysteme GmbH & Co. KG. – Mode access: <http://www.rabe-agrarsysteme.com>.
7. Landschaftspflege [Electronic resource]: The Right Road for Land Conservation... / FRANK. – Mode access: <http://www.frank-wst.de>.
8. Productos de Bellota [Electronic resource] / Bellota. – Mode access: <http://www.cofelam.com>.
9. Produkte [Electronic resource]: The Agro Vision Company / Lemken. – Mode access: <http://www.lemken.com>.
10. Плуги простые (Gregoire-Besson) [Электрон. ресурс]. Модельный ряд // Мировая техника. – Режим доступа: <http://www.mirtech.ru>.
11. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Жабуренок С.Н. Повышение износостойкости при упрочнении плужных лемехов диффузионно-легированной чугунной стружкой // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 5. – С. 17–20.
12. Константинов В.М., Пантелеенко Ф.И., Жабуренок С.Н., Девойно О.Г., Авсиевич А.М. Техничко-экономическая эффективность упрочнения наплавкой рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Сварщик в Беларуси. – 2003. – № 1. – С. 12–13.
13. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1995. – 335 с.
14. Жабуренок С.Н. Повышение долговечности плужных лемехов наплавкой диффузионно-легированными сплавами из чугунной стружки и последующей термической обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2004. – 24 с.
15. СТБ 1388-2003. Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия. – Минск: Госстандарт, 2003. – 12 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

*А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович, В.М. Голуб  
Физико-технический институт НАН Беларуси*

Механизм соединения разнородных металлов при сварке давлением в вакууме достаточно сложен и состоит из комплекса различных физических процессов: обеспечения максимально возможного физического контакта свариваемых поверхностей, ликвидации поверхностных окисных и адсорбированных пленок, активирования поверхностных слоев деформированием соединяемых материалов, объемных и поверхностных диффузионных процессов, рекристаллизации и т.д.

Кроме этого, 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 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 объемный характер процесса схватывания.

Осуществление процесса схватывания в условиях импульсной деформации позволило значительно упростить получение практически полного физического контакта соединяемых поверхностей, а

также значительно увеличить степень их активации. При этом 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 оригинальной конструкции, созданной на базе устройства вакуумного напыления УРМ 3279011, оснащенного резистивным нагревателем и электронно-лучевой пушкой с блоком управления. Разработанная установка состоит из вакуумной камеры колпачного типа, устройства высокоскоростного нагружения, источника очистки и нагрева исследуемых образцов (рис. 1).

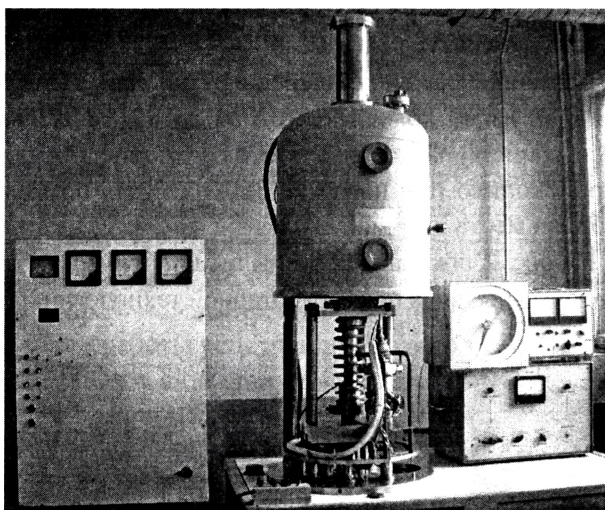


Рис. 1. Установка для импульсной диффузионной сварки в вакууме

Получение разряда, необходимого для работы электроннооптической системы, осуществляется паромасляным диффузионным ВА-2-Зпр 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 термопарная лампа ЛТ-2 и ионизационная лампа ЛМ-2.

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

Импульсную сварку 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 дислокаций 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 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 определенные оптимальные параметры процесса.

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

Для сочетания металлов, образующих на 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.

Для исследования физических явлений, возникающих в области сварного шва, были изготовлены цилиндры диаметром 60 мм и высотой 10 мм из различных материалов (Ti, Cu, Zr, Fe). В свар-

ных соединениях Ti-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu, полученных импульсной сваркой в вакууме (ИСВ), после отжига в области контакта наблюдается равномерный рост слоя интерметаллидов. Это, очевидно, обусловлено тем, что в процессе совместного деформирования методом ИСВ успевают произойти процессы образования полного физического контакта, активации и схватывания контактных поверхностей. Поэтому можно предположить, что при ИСВ 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. Установлено, что при ИСВ массоперенос в соединяемых телах значительно превышает диффузионную подвижность атомов в твердом состоянии. Высокая температура резко увеличивает концентрацию межузельных атомов свариваемых металлов, ускоряя тем самым «залечивание» дефектов.

При ИСВ 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.

Отсутствие хрупких интерметаллидных фаз в зоне контакта исследуемых соединений, наличие развитой зоны объемного взаимодействия — все это обеспечивает высокое качество сварных соединений, полученных ИСВ. Хорошая пластичность подтверждается испытаниями на изгиб.

Технология сварки композиций Ti-Cu, Zr-Cu отрабатывалась на примере сварки конструкционной стали с медью. В твердом состоянии железо и медь имеют весьма незначительную взаимную растворимость. При температуре 1100°C 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. В камере созда-

валось разрежение  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Детали перед сваркой очищали следующим образом: медные детали после обработки резцом обезжиривали в трихлорэтилене, травили в 10%-ной  $H_2SO_4$  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 после обработки резцом также обезжиривали в трихлорэтилене, травили с помощью ультразвука в смеси 2% HF + 50%  $HNO_3$  + 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°C. В результате был выбран следующий режим сварки: выдержка при максимальной температуре 10 мин, температура 810° С.

Величина разрушающей нагрузки при испытании на изгиб колеблется от 24 до 35 МПа. При испытаниях на растяжение разрушение образца происходило при нагрузке 350-360 МПа по меди вблизи места сварки.

На рис. 2 показаны образцы биметаллических катодов, сваренных по разработанной технологии.

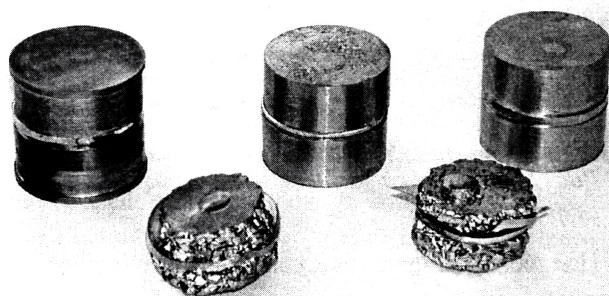


Рис. 2. Образцы Ti-Cu, Ti-Mo-Cu, Zr-Cu, Fe-Cu, сваренные методом ИСВ

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование высокоскоростной диффузионной сварки в условиях вакуума позволяет решить задачу получения надежного соединения химически активных металлов с различными теплофизическими характеристиками.