УДК 621.791.18

С.А.ЕРМОЛИН, *канд. техн. наук, доцент, sae0706@yandex.ru*
А.С.ТАРАСОВ, *канд. техн. наук, доцент, ast47@rambler.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

S.A.ERMOLIN, *PhD in eng. sc., associate professor, sae0706@yandex.ru*
A.S.TARASOV, *PhD in eng. sc., associate professor, ast47@rambler.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ АКУСТИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Представлены результаты экспериментального исследования возможности диффузионной сварки магнитострикционных преобразователей из пермендюра с концентраторами (трансформаторами колебаний) из титана. Рассмотрены устройство установки диффузионной сварки, параметры процесса сварки и результаты испытаний сварных соединений.

***Ключевые слова*:** диффузионная сварка, магнитострикционный преобразователь, концентратор, титан.

EVALUATION OF POSSIBILITY OF DIFFUSION WELDING OF ACOUSTIC UNITS

The article presents the results of experimental research of possibilities of diffusion welding of magnetostrictive converters of magnetostrictive alloy with concentrators (transformers fluctuations) made of titanium. Described the setting diffusion welding, the parameters of the welding process and the results of tests of welded joints.

***Key words*:** diffusion welding, magnetostrictive transducer, hub, titan.

Акустические узлы мощных ультразвуковых установок состоят из преобразователя, собранного из пластин магнитострикционного сплава 49КФ2 (пермендюра) и концентратора (трансформатора колебаний) из прочной стали. Основным способом неразъемного соединения данных элементов остается пайка дорогими серебряными припоями[*].

Существенно улучшить выходные характеристики акустических узлов можно посредством использования титановых сплавов в качестве материала для изготовления концентраторов, поскольку титан, кроме высокой прочности и коррозионной стойкости, обладает хорошими акустическими свойствами.

Акустические свойства материалов (ρ – плотность металла; E – модуль упругости; ρC – волновое сопротивление):

Материал	ρ, г/см^3	E, кг/мм^2	C, см/с	ρC, г/(см^2·с)
Железо	7,8	$2{,}1 \cdot 10^4$	$5{,}17 \cdot 10^5$	$40{,}4 \cdot 10^5$
Никель	8,8	$2{,}05 \cdot 10^4$	$4{,}78 \cdot 10^5$	$41{,}5 \cdot 10^5$
Сталь	7,8	$2{,}04 \cdot 10^4$	$5{,}05 \cdot 10^5$	$39{,}4 \cdot 10^5$
Свинец	11,4	$0{,}16 \cdot 10^4$	$1{,}18 \cdot 10^5$	$13{,}4 \cdot 10^5$
Титан	4,52	$1{,}16 \cdot 10^4$	$5{,}07 \cdot 10^5$	$22{,}9 \cdot 10^5$

Вторым направлением улучшения характеристик является замена пайки на свар-

[*] *Петушко И.В.* Оборудование для ультразвуковой очистки. СПб, 2004, 150 с.
Petushko I.V. Equipment for ultrasonic cleaning. Saint Petersburg, 2004, 150 p.

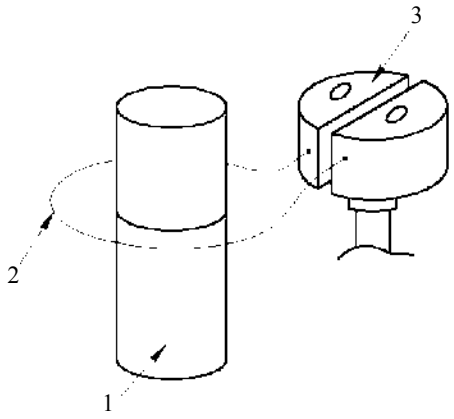


Рис.1. Система электроннолучевого нагрева

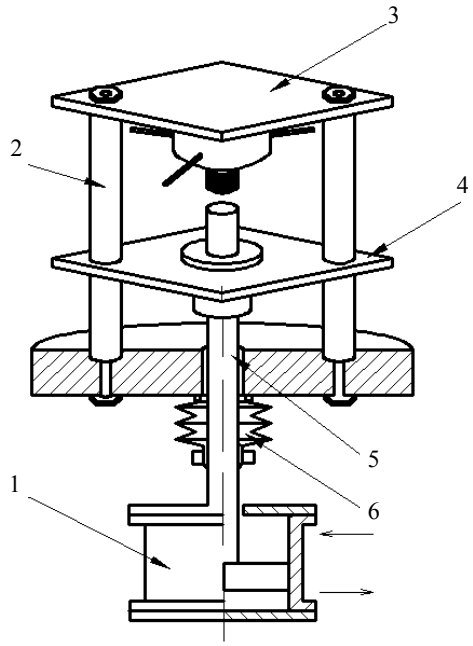


Рис.2. Система сжатия

ку, так как сварные соединения более стабильны и характеризуются большей усталостной прочностью.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по отработке режимов вакуумной пайки и опробованию режимов диффузионной сварки пермендюра (49КФ2) с титановым сплавом ВТ22, химический состав которого приведен ниже:

Элемент	Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr
Содержание, %	82	5	5	5	1	1

Материалом исследования являлись монолитные образцы пермендюра размером 20×20×30 мм, вырезанные из листов горячекатаного подката. Из титанового сплава ВТ22 были изготовлены образцы диаметром 30 мм и высотой 50 мм.

Вакуумная пайка и диффузионая сварка выполнялись на модернизированной установке – вакуумной камере, в которой размещалась система электроннолучевого нагрева (рис.1), состоящая из катода 2 (петля проволоки из вольфрама) с токоподводами 3 и анода, каковым является нагреваемый образец или изделие 1.

Система сжатия (рис.2) состоит из расположенного вне камеры пневмоцилиндра 1, шток которого 5 введен в камеру через сильфон 6. Свариваемые образцы помещаются между неподвижной верхней 3 и подвижной нижней 4 плитами, смонтированными на двух направляющих 2.

При разработке технологии пайки титана и его сплавов возникает ряд затруднений, причиной которых является высокая химическая активность этого металла.

Другая причина непрочного сцепления паяных швов с титаном – способность образовывать с компонентами многих припоев хрупкие интерметаллиды, располагающиеся в виде тонких прослоек по границам шва*. Интерметаллид TiAg, образующийся при пайке серебром, относительно более пластичен, чем интерметаллиды титана с железом, никелем или медью, однако прочность паяных соединений невысока вследствие разницы коэффициентов линейного расширения интерметаллида и титана, приводящей под действием напряжений к образованию трещин.

Ограничение роста сплошных широких интерметаллидных прослоек при пайке серебряными припоями наблюдается при кратковременном контакте жидкого припоя с паяемым металлом, что характерно для источников нагрева повышенной мощности. Чаще всего с этой целью используется индукционный нагрев.

* Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р.Рябов, Д.М.Рабкин, Р.С.Курочко и др. М., 1984. 239 с.
Welding of dissimilar metals and alloys / V.R.Ryabov, D.M.Rabkin, P.S.Kurochko, etc. Moscow, 1984. 239 p.

Наконец, при диффузионной пайке с повышением температуры нагрева и увеличением времени выдержки пайки титановых сплавов происходит растворение ранее образовавшейся интерметаллидной прослойки, а в некоторых случаях она вообще не возникает. Прочность таких соединений становится соизмеримой с прочностью основного металла.

Пайка образцов пермендюра и титана серебряным припоем ПСР-40 производилась в вакууме $5\text{-}7\cdot10^{-3}$ мм.рт.ст. при температуре 680 °С в режиме: нагрев со скоростью 150 °С/мин., выдержка в течение 10 мин., охлаждение до температуры 100 °С в течение 30 мин. Температура измерялась термопарой, зачеканенной на расстоянии 10 мм от паяного стыка.

В связи с трудоемкостью механической обработки пермендюра оценка механических свойств производилась не на стандартных образцах, а посредством разрушения закрепленных в захватах испытательной машины сварных образцов.

Среднее значение удельной прочности серии из 5 паяных образцов составило 230 МПа. Оценочная величина прочности паяных в печах в среде аргона соединений пакетов пермендюра с концентраторами из титана составляет 200 МПа. Использование более мощного электроннолучевого источника нагрева предотвращает негативное влияние процесса образования интерметаллидных прослоек.

До настоящего времени предпринимались попытки сварки акустических узлов для ультразвуковой мойки. Акустический узел для мойки состоит из магнитострикционного пакета и излучающей пластины, в которой фрезеровались продольные пазы. Прижатый с обратной стороны пластины пакет приваривался сквозь пазы аргонодуговой сваркой с присадкой.

Чтобы понять значимость сварки для пермендюра, можно сравнить ее с пайкой. Уровень магнитной индукции после сварки может изменяться от 1,53 до 1,65 Тл в зависимости от соотношения объема и толщины деталей из пермендюра и магнитомягкой стали. Соединения, паяные в вакууме в процессе высокотемпературного вакуумного отжига, также однородны и прочны, но уровень магнитных свойств изменяется более резко, чем при сварке, что и является ключевым фактором при выборе оптимального способа соединения. В процессе испытаний на растяжение установлено, что зоны разрушения образцов в сварных соединениях концентрируются в околошовной зоне, а в паяных преимущественно в паяном шве.

Как и при пайке, основной проблемой получения качественного сварного соединения является образование интерметаллидов. Появление интерметаллидов в сплаве Ti-Fe значительно повышает прочность, но резко снижает пластичность. Растворимость титана в α-железе достигает 6,9 % при температуре 1573 К и с понижением температуры резко уменьшается; при 293 К растворимость титана в α-железе менее 2 %. Максимальная растворимость железа в β-титане при эвтектической температуре (1353 К) составляет 25 %. Непосредственная сварка титана со сталью не дает положительных результатов. На практике сварку ведут через вставки или прокладки. Единственный металл, хорошо соединяющийся с титаном и сталью без образования интерметаллидных фаз, – ванадий. Практически отсутствуют сведения о характере свариваемости титана с кобальтом, присутствующим в пермендюре в количестве 49 %. Поэтому в данной работе в качестве промежуточного материала использовались прокладки из фольги ванадия толщиной 0,2 мм.

Вторым ограничивающим фактором является температура точки Кюри пермендюра, равная 980 °С. Преимуществом диффузионной сварки перед другими способами является возможность получения сварного соединения в твердой фазе при рекомендованных температурах на уровне 0,7 $T_{\text{рекр}}$.

Эксперименты по диффузионной сварке выполнялись на таких же образцах, которые использовались для пайки. Усилие сжатия составляло 0,5 МПа. Температура сварки варьировалась от 850 до 900 и 950 °С. Время выдержки при каждой температуре составляло 5 мин. При каждом значении температуры были выполнены по два сварных соединения.

Качественную оценку прочности сварных соединений производили посредством разрушения в захватах испытательной машины. В серии из 9 испытаний были получены значения напряжения разрушения в пределах от 280 до 360 МПа. Разрушение каждый раз происходило по месту сварки, однако полученные значения существенно выше ранее указанных значений прочности паяных соединений.

Таким образом, диффузионную сварку можно рассматривать как перспективный способ соединения элементов акустических узлов мощных ультразвуковых систем.