

Канд. физ.-мат наук В. М. Шулаев<sup>1</sup>, канд. техн. наук Д. А. Листопад<sup>2</sup>, А. В. Карпенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
<sup>2</sup> ООО «Торговый дом «ОТТОМ», г. Харьков;

<sup>3</sup> Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье

## СОВРЕМЕННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ «ОТТОМ» ТМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

*Вакуумная высокотемпературная пайка высоколегированных коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких сталей используется в основном в производстве авиационных двигателей и их составных частей. Так паяют конструкции, имеющие труднодоступные полости, а также для исключения коррозии, создаваемой остатками флюсов. В ряде случаев пайка в вакууме более экономична, чем другие виды пайки.*

**Ключевые слова:** вакуумные электропечи, высокотемпературная пайка высоколегированных коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких сталей.

### Введение

#### Особенности технологического процесса вакуумной пайки

Процесс пайки в вакуумных электропечах проводится в условиях безокислительного нагрева узлов сложной конфигурации и с объемным расположением паяных швов. Пайка может быть штучная – для крупно- и среднегабаритных узлов (сотовых уплотнений, направляющих аппаратов компрессора, топливных коллекторов) и групповая – для мелких и среднегабаритных узлов (трубопроводов, лопаток, форсунок, крыльчаток, теплообменников).

При пайке в вакууме должен быть обеспечен текущий постоянный контроль за следующими параметрами:

- давлением остаточных газов в течение термического цикла;
- скоростью нагрева;
- температурой пайки (при установленных температурных перепадах на нагреваемом узле);
- длительностью и температурой промежуточных изотермических выдержек (при необходимости их применения), длительностью выдержки при температуре пайки;
- скоростью охлаждения;
- температурой выгрузки паяного узла.

Контроль температуры нагрева под пайку следует осуществлять горячими спаями термопар, которые надежно контактируют с металлом паяемого узла. Если основной металл после пайки должен быть термообработан, то при общем нагреве узла необходимо применять припой с температурой пайки выше температуры термообработки или совмещать операции пайки и тер-

мообработки. Нагрев легированных сталей от температур выше 1100 °С до температуры пайки рекомендуется осуществлять с возможно более высокими скоростями и малыми выдержками при температуре пайки во избежание образования крупнозернистой структуры и ухудшения свойств основного металла (жаропрочности, сопротивления усталости, ударной вязкости).

#### Отечественное технологическое оборудование для вакуумной пайки

Пайка в вакуумных печах – наиболее рационально раскрывает все технологические преимущества, обеспечивает стабильность качества соединений, позволяет максимально механизировать и автоматизировать процессы выполнения пайки.

Согласно нового ГОСТ Р 53542-2009 для пайки легированных сталей в вакууме необходимо использовать вакуумные электропечи (далее по тексту «Печь» или «Печи») с водоохлаждаемым двухстеночным корпусом, оборудованные системой откачки, которая обеспечивает вакуум в рабочем пространстве Печи не менее  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) как в процессе нагрева под пайку, так и при температуре пайки. Термопарные и ионизационные преобразователи должны измерять вакуум непосредственно в рабочей камере. Конструкция вакуумной печи должна обеспечивать натекание не более 0,066 л·Па/с (0,5 л·мм рт. ст./с). Номинальная мощность Печи и размеры рабочего пространства должны обеспечивать заданные термические режимы нагрева под пайку паяемого узла и температурные перепады на узле (см. таблицу).

**Таблиця – Технические характеристики вакуумных электропечей для пайки**

Наименование параметра	Норма параметра				
	СЭВЭ-3.3/13-ИП-ОТТОМ (рис. 1)	СНВЭ-2.4.2/13-ИП-ОТТОМ (рис. 2)	СНВЭ-6.6.4/13-ИП-ОТТОМ (рис. 3)	СГВ-2.4-2/15-ИП-ОТТОМ (рис. 4)	СШВЭ-8.12/13-ИП-ОТТОМ (рис. 6)
Максимальная температура, °С	1300	1300	1300	1300	1300
Установленная мощность, кВт	35	35	75	30	200
Масса садки, кг	50	30	200	25	500
Вакуум*, Па (мм рт. ст.)	$1,33 \cdot 10^{-3}$ ( $1 \cdot 10^{-5}$ )	$1,33 \cdot 10^{-3}$ ( $1 \cdot 10^{-5}$ )	$1,33 \cdot 10^{-2}$ ( $1 \cdot 10^{-4}$ )	$6,65 \cdot 10^{-3}$ ( $5 \cdot 10^{-5}$ )	$1 \cdot 10^{-3} \times$ $\times (1,33 \cdot 10^{-1})$
Размеры рабочего пространства, мм	Ø300×Н300	200×400×200 (Ш×Д×В)	600×600×400 (Ш×Д×В)	Ø200×Н400	Ø800×Н1200
Габариты Печи (Ш×Д×В), мм	3350×2875 ×2960	2910×875 ×1800	5450×5995 ×3200	1800×2100 ×2500	5000×3800 ×4000
Масса Печи, кг	4300	1500	5800	2000	10 000
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	2,5	1,5	3,5	2,5	25

\* Остаточное давление в рабочем пространстве электропечи в холодном состоянии после обезгаживания печи путем нагрева до номинальной температуры

Печи для пайки по способу загрузки могут быть: элеваторного типа (рис. 1) (загрузка снизу с перемещением каретки с садкой внутри камеры в зону нагрева); камерного типа (с горизонтально расположенной рабочей камерой) малого объема (рис. 2) или большого объема (рис. 3); копкавого типа (рис. 4) (с перемещением камеры нагрева вверх и загрузкой узлов на садочный столик); шахтного типа (рис. 6) (с загрузкой изделий в рабочую камеру сверху).

Отсутствие внутри рабочего пространства Печей огнеупорных и теплоизоляционных материалов позволяет быстро достигать (не более 45 мин) и стабильно поддерживать высокий вакуум, а также обеспечивать минимальное газовыделение из элементов нагревательного модуля, что позволяет получать стабильно высокое качество паяемых изделий. Благодаря относительно малой массе нагревательный модуль характеризуется низкой тепловой инерционностью. Это позволяет обеспечить его ускоренное охлаждение с помощью нейтрального газа. Все Печи представленные в таблице являются экологически чистыми.

При высокотемпературной пайке в Печах применяют нагревательный модуль из молибдена. Для защиты молибденовых нагревателей от взаимодействия с испаряющимися легколетучими компонентами, входящими в состав припоев может применяться специальный муфель (рис. 5). Другой способ защиты нагревателей – оснащение Печи системой напуска нейтрального газа, способствующего снижению скорости испарения элементов с низким давлением паров в припое при нагреве под пайку также с целью обеспечения ускоренного охлаждения садки после пайки. Для достижения более высоких скоростей охлаждения узлов после пайки могут быть применены системы с принудительной конвекцией инертного газа, находящегося в рабочей камере Печи.

Тип и мощность Печи выбирают в зависимости от следующих параметров:

- массы, конфигурации, размеров изделия и пространственного расположения паяных соединений;
- необходимой производительности;
- удобства и технической возможности осуществления операции загрузки-выгрузки узлов;
- термических режимов пайки и охлаждения;
- технической оснащенности производства;
- условий формирования паяных соединений.

Печь для вакуумной пайки должна иметь одну или более тарированных термопар для контроля и управления процессом нагрева. Температурная однородность по объему рабочей камеры Печи в стационарном режиме нагрева должна быть не менее  $\pm 10$  °С. Для обеспечения этой величины Печи с рабочей камерой большого объема (более 0,3 м<sup>3</sup>) должны быть снабжены несколькими секциями нагревателей, управляемыми автономно (раздельными электрическими зонами Печи).

Печи для вакуумной пайки торговой марки «ОТТОМ» оснащены системой автоматизированного управления для обеспечения нагрева по заданной температурно-временной зависимости с выводом информации на графический дисплей. В процессе работы идет непрерывное документирование всех технологических параметров процессов вакуумной пайки в режиме реального времени, с возможностью вывода протокола работы Печи на печать на цветном лазерном принтере, что позволяет исключить брак по вине оператора и диагностировать состояние Печи в процессе работы. Адаптивная система управления должна автоматически снижать скорость нагрева при снижении вакуума и так же автоматически повышать скорость при восстановлении заданного уровня вакуума.



**Рис. 1.** Общий вид электропечи сопротивления элеваторной вакуумной модели СЭВЭ-3.3/13-ИП-ОТТОМ

Вакуумная элеваторная электропечь сопротивления модели СЭВЭ-3.3/13-ИП-ОТТОМ (рис. 1) нового поколения предназначена для проведения вакуумной пайки. Тип садки – моноблочный или составной. Направление загрузки – горизонтальное. Способ загрузки – вилочным погрузчиком или вручную. Максимальные габариты изделий: диаметр (не более) 300 мм, высота (не более) 300 мм. Форма изделий – произвольная. Максимальная одновременная масса загружаемых изделий на термообработку за один цикл не более 50 кг. Печь представляет собой модульную конструкцию. Она состоит из следующих основных узлов, систем и механизмов: вертикальной вакуумной камеры и эстакады, которая с трех сторон окружает вакуумную камеру, вилочного погрузчика. Под эстакадой размещены такие системы: вакуумная, водяного охлаждения, система электропитания и управления, а также печной трансформатор. Кроме того, эстакада выполняет функции площадки обслуживания токовводов и верхней термопары.



**Рис. 2.** Вакуумная камерная электропечь модели СНВЭ-2.4.2/13-ИП-ОТТОМ

Электропечь сопротивления камерная вакуумная модели СНВЭ-2.4.2/13-ИП-ОТТОМ (рис. 2) нового поколения предназначена для проведения вакуумной пайки при температурах до 1300 °С в авиационной промышленности.



**Рис. 3.** Вакуумная камерная электропечь модели СНВЭ-6.6.4/13-ИП-ОТТОМ

Электропечь сопротивления камерная вакуумная СНВЭ-6.6.4/13-ИП-ОТТОМ (рис. 3) нового поколения предназначена для проведения процесса вакуумной пайки при температурах до 1300 °С. Вилочный погрузчик предназначен для загрузки (выгрузки) изделий в Печь. Вертикальное перемещение вилок с садкой осуществляется гидродомкратом с ручным приводом. Горизонтальное перемещение погрузчика вдоль оси Печи осуществляется по рельсовому пути вручную. Грузоподъемность – не более 200 кг. Ход каретки – 100 мм. Печь применима при изготовлении ответственных изделий из жаропрочных и жаростойких материалов, эксплуатируемых при высоких температурах. Рафинирование припоя и основного материала в процессе нагрева в вакууме приводит к повышению качества и срока службы паяных изделий.



**Рис. 4.** Вакуумная двухколпаковая электропечь сопротивления модели СГВ-2.4-2/13-ИП-ОТТОМ

Электропечь сопротивления двухколпаковая вакуумная модели СГВ-2.4-2/13-ИП-ОТТОМ (рис. 4) нового поколения, предназначена для проведения вакуумной пайки при температурах до 1300 °С. Электропечь СГВ-2.4-2/13-ИП-ОТТОМ является единым конструктивным монтажно-транспортным блоком. Электропечь состоит из основных узлов, систем и механизмов: вакуумная камера (два колпака); опорные секции; механизм подъема; вакуумная система; система водоохлаждения; печной трансформатор; шкаф электропитания с тиристорным регулятором мощности; система управления

в рабочем режиме – автоматическая; в наладочном – ручная. Для подъема и опускания колпака при загрузке и выгрузке садки имеется механизм подъема, каретка которого перемещается по направляющей колонне с помощью ходового винта и гайки. Привод механизма – электромеханический. Работа колпаков Печи – поочередная.

Вакуумная камера устанавливается на опорную секцию, закрепленную на каркасе. В секции размещены нижние теплоизоляционные экраны, а также молибденовый нагреватель и молибденовая подставка (стол) для установки садки. Вакуумная система состоит из двух механических форвакуумных насосов, одного диффузионного паромасляного насоса, двух вакуумных затворов и необходимого количества вакуумных клапанов. Вакуумная система обеспечивает откачку электропечи как форвакуумным, так и высоковакуумным насосами.

Вакуумная камера (колпак) представляет собой вертикальный водоохлаждаемый цилиндр, с верхнего торца закрытый водоохлаждаемой крышкой. На колпаке расположены выводы токоподводов и бобышка подвески к механизму подъема колпака. Внутри корпуса вакуумной камеры расположена экранная теплоизоляция и нагреватели. Теплоизоляция выполнена в виде пакетов экранов, которые изготовлены из молибденового листа. Нагреватели выполнены из молибдена. Основное отличие данного типоразмера электропечи состоит в использовании нагревательного модуля новой конструкции (рис. 5). Он обеспечивает высокую однородность температуры, исключает загрязнение нагревателей от испарения легколетучих компонентов входящих в состав термообрабатываемых сплавов. Например – серебра из сплава серебро-палладий используемого в качестве припоя для вакуумной пайки ответственных деталей.

Вакуумная шахтная электропечь сопротивления модели СШВЭ-8.12/13-ИП-ОТТОМ (рис. 6) предназначена для вакуумной пайки и вакуумного отжига деталей из электростали в диапазоне температур от 700 до



Рис. 5. Молибденовый нагревательный модуль с муфелем колпака печи модели СГВ-2.4-2/15-ИП-ОТТОМ

1100 °С. Вакуумной пайке подвергаются системы: Ст.12Х18Н10Т+медьМ1 и Ст.20+Ст.20 и другие. Исполнение Печи – шахтное. Тип садки – составной. Направление загрузки – вертикальное (сверху-вниз). Собранные узлы и детали устанавливаются на поду. Способ загрузки – с помощью цеховых грузоподъемных средств или ручной.



Рис. 6. Вакуумная шахтная электропечь модели СШВЭ-8.12/13-ИП-ОТТОМ

В заключение хочется отметить некоторые характеристики присущие всем Печам торговой марки «ОТТОМ». Вся контрольно-измерительная аппаратура и система световой сигнализации, включая систему автоматического управления, выполнена на базе микропроцессорного контроллера. Измерение вакуума в Печи производится датчиками, которые являются манометрическими, термометрическими и магниторазрядными преобразователями. Давление откачиваемого газа измеряется также с помощью электроконтактного мановакуумметра. Электропитание нагревателя осуществляется от понижающего трансформатора, первичные обмотки которого подключены к тиристорному регулятору мощности. Режим работы нагревателей контролируется с помощью сенсорной панели оператора. Система автоматического управления выполнена на базе программируемого логического контроллера с человеко-машинным русскоязычным интерфейсом. Система автоматического управления обеспечивает архивацию на цифровом носителе (с выводом графиков на экран), а также диагностирует состояние ряда элементов Печи в случае возникновения критических аварийных ситуаций. Работа Печи, включая проведение вакуумной пайки и управление вакуумной системой, осуществляется по программе с помощью системы автоматического управления, выполненной на базе микропроцессорных устройств.

Система электропитания и управления обеспечивает автоматизированное управление. Основные функции управления:

- регулирование температурного режима в рабочем пространстве модуля нагрева Печи по заданной программе;
- возможность задания нескольких программ вакуумной пайки;

- цифровое отображение на дисплее заданного и текущего значений температуры; контроль над работой системы нагрева на базе промышленного микропроцессорного регулятора температуры, имеющего интерфейс связи с компьютером, и ручной (наладочный) режим управления.

- цифровое отображение остаточного давления в различных технологических точках Печи;
- управление вакуумной системой в ручном и автоматическом режимах;
- архивирование технологических процессов;
- аварийную световую и звуковую сигнализацию.

### Выводы

Применение новых вакуумных Печей сопротивления торговой марки «ОТТОМ» для вакуумной пайки деталей и заготовок из высоколегированных сталей имеет ряд основных преимуществ:

- получается светлая поверхность при термообработке легкоокисляемых металлов и сплавов из-за того, что разрушается исходная оксидная пленка и не образуется новая;
- исключается водородное охрупчивание поверхности стали;
- происходит дегазация из поверхностного слоя изделия как сопутствующий процесс при нагреве;
- деформация и коробление деталей минимальны;
- в результате обеспечивается чрезвычайно высокое качество паяных узлов;
- полная экологическая безопасность технологии вакуумной пайки.

Дополнительные преимущества применения вакуумных Печей состоят в следующем:

- Печи полностью автоматизированы, что обеспечивает высокую воспроизводимость технологических

параметров термообработки и свойств получаемых изделий.

- существенно уменьшается расход энергии, не требуются капитальные вложения на охрану окружающей среды (вакуумная термообработка является энергосберегающей технологией);

- улучшаются условия труда за счет полного исключения теплового загрязнения окружающей среды;
- для работы на Печах нет необходимости нанимать высококвалифицированный персонал.

Вакуумные электропечи торговой марки «ОТТОМ» производятся по современной технологии «холодной стенки» - корпус печи имеет водоохлаждаемую рубашку. Таким образом, температура на внешней поверхности в случае термических установок не превышает 40...45 °С, а значит получить ожог при касании стенки невозможно. Кроме того, из вакуумных электропечей не происходят газовые выбросы в цех, поэтому обычные, для традиционных технологий, меры пожарной безопасности не требуются.

Вакуумные электропечи обладают сравнительно большой закупочной стоимостью, однако эксплуатационные расходы существенно ниже, чем для электропечей с защитной атмосферой. При учете этих двух факторов стоимость вакуумной пайки за весь период эксплуатации Печи будет заметно ниже, чем пайка в защитной атмосфере. Кроме того, вакуумные электропечи можно включать в любой момент, в зависимости от производственной необходимости.

Использование вакуумных электропечей сопротивления торговой марки «ОТТОМ» в каждом конкретном производстве открывает ряд других возможностей. Поэтому закупка вакуумных Печей достаточно быстро окупается за счет низких эксплуатационных расходов и высокого качества получаемой продукции.

Одержано 19.12.2013

### Шулаев В.М., Листопад Д.А., Карпенко Г.В. Сучасні вакуумні електропечі «ОТТОМ» ТМ і перспективи їх використання для високотемпературної пайки виробів з високолегованих сталей

*Вакуумна високотемпературна пайка високолегованих корозійностійких, жароміцних та жаростійких сталей використовується в основному у виробництві авіаційних двигунів та їх складових частин. Так паяють конструкції, що мають важкодоступні порожнини, а також для виключення корозії, створюваної залишками флюсів. У ряді випадків пайка у вакуумі більше економічна, ніж інші види пайки.*

**Ключові слова:** вакуумні електропечі, високотемпературна пайка високолегованих корозійностійких, жароміцних та жаростійких сталей.

### Shulaev V., Listopad D., Karpenko A. Modern vacuum furnaces «ОТТОМ» TM and the prospects for their use in high-temperature brazing products from high-alloy steels

*Vacuum brazing of highly-alloyed corrosion-resistant and heat-resistant steels is used primarily in the production of aircraft engines and their components. Thus solder structure having a hard cavity and to prevent corrosion of flux residues generated. In some cases, vacuum brazing is more efficient than other types of soldering.*

**Key words:** vacuum furnaces, high-temperature brazing of highly-alloyed corrosion-resistant and heat-resistant steels.