

**ТЕРМОВОЗДУШНАЯ ПАЙКА  
ГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕДИ**

**Д. М. Мордасов<sup>1</sup>, П. В. Монастырев<sup>2</sup>, М. Д. Мордасов<sup>1</sup>,  
А. Ф. Зубков<sup>3</sup>, К. А. Андрианов<sup>3</sup>, В. А. Езерский<sup>4</sup>**

*Кафедры: «Материалы и технология» (1), mit@tstu.ru;  
«Конструкции зданий и сооружений» (2); «Городское строительство  
и автомобильные дороги» (3); «Архитектура и градостроительство» (4),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** анализ изломов; дефекты паяного шва; низкотемпературная пайка; физико-механические испытания; флюс; хлорид аммония; хлорид цинка.

**Аннотация:** Рассмотрены технологические особенности низкотемпературной пайки тонкостенных изделий из меди с применением в качестве теплоносителя нагретого газа (воздуха). С применением разработанной технологии получены экспериментальные образцы стыковых, нахлесточных и тавровых паяных соединений. В результате механических испытаний паяных соединений показаны их высокие механические свойства. Осуществлена оценка и получены зависимости прочности при разрушении от относительной площади дефектов при термовоздушной пайке различных соединений.

---

**Введение**

При изготовлении габаритных тонкостенных изделий из меди, таких как корпуса теплообменников, объемные и коаксиальные резонаторы и др., возникает ряд прикладных научных проблем [1].

В связи с высокой теплопроводностью, жидкотекучестью и усадкой при затвердевании меди, ее сварка затруднена по причине возникновения значительных деформаций и напряжений. Кроме того, высокая активность меди в жидком состоянии по отношению к кислороду, а также ее способность растворять большое количество водорода («водородная болезнь») приводят к образованию трещин и пор в сварном шве. Данный факт обуславливает преимущественное применение пайки для получения неразъемных соединений деталей из меди.

Другой проблемой, связанной с получением качественного неразъемного соединения, является окисление меди при нагреве. Медь начинает взаимодействовать с кислородом при 200 °С. При этом образуется оксид CuO, распад которого начинается при температуре порядка 800 °С. Для предотвращения окисления очищенной поверхности меди на нее наносят тонкий слой припоя – полуду. Однако некоторые припои при определенных температурах образуют с медью хрупкие прослойки интерметаллидов, которые ухудшают паяемость.

Таким образом, к числу особенностей меди, влияющих на выбор способа пайки, относятся химическая стойкость оксидов, склонность кислородсодержащей меди к водородной хрупкости, повышенная способность меди образовывать интерметаллиды с некоторыми компонентами припоев.

Выбор материала припоя и состава флюса не дает полной гарантии получения качественного паяного соединения, если выбран неадекватный способ нагрева. При пайке тонкостенных изделий из меди, с учетом физико-химических процессов, происходящих при ее нагреве, актуальной задачей является разработка и применение способов и температурно-временных режимов низкотемпературного нагрева.

Широкое распространение в промышленности получила пайка в печах, поскольку при этом обеспечивается равномерный нагрев соединяемых изделий без их деформации даже при больших габаритах изделий [2 – 4]. Несмотря на очевидные преимущества данной технологии, основным недостатком является отсутствие на Российском рынке печей с большими габаритами рабочих камер. Представленное на рынке оборудование импортного производства предназначено для пайки небольших объектов в электронной промышленности. Зарубежные производители предлагают изготовление под заказ, однако стоимость такого оборудования высока, а в условиях часто меняющейся номенклатуры и типоразмеров изделий, изготовленная и приобретенная печь для пайки одного изделия может оказаться бесполезной для другого.

Разновидностью пайки в печи является пайка в вакууме. Она успешно применяется для соединений многих металлов, в том числе и меди. Этот вид пайки проводится в вакуумных печах или контейнерах, загруженных в обычные печи. Паяные швы, полученные при использовании нагрева в вакууме, отличаются чистотой исполнения, прочностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью. К недостаткам способа пайки в вакууме следует отнести сложность применяемого оборудования [5].

Пайка электросопротивлением [6], при которой нагрев осуществляется теплом, выделяющимся при протекании электрического тока через паяемые детали, с успехом применяется для идеально плоских деталей, а также в электротехнике для соединения проводов. Недостатком данного способа является возможность перегрева контактирующих поверхностей массивных деталей, например медных проводников, вследствие чего происходит неравномерный нагрев паяемого соединения; возникает нестабильность контакта «электрод – деталь», трудности в воспроизведении постоянного режима, неравномерности в подводе теплоты из-за прерывистого включения источника питания для предотвращения перегрева угольных электродов, а также невозможность пайки деталей с поверхностями, отличными от плоских.

Для пайки массивных деталей широко применяется пайка погружением в расплавы солей, находящиеся в соляных печах-ваннах. Соли обычно служат источником тепла и оказывают флюсующее действие, поэтому дополнительного флюсования при пайке не требуется. При пайке погружением в ванну с припоем предварительно офлюсованные детали нагревают в расплаве припоя, который при температуре пайки заполняет соединительные зазоры [7]. Пайка погружением имеет следующие недостатки: большой расход электроэнергии, связанный с потерей тепла через свободную поверхность жидкой ванны в результате излучения и конвективного обмена; наличие вредных для здоровья испаряющихся компонентов расплава; необходимость устранения наплывов припоя с изделия после пайки и большая трудоемкость опилочных работ; высокие остаточные деформации; низкая коррозионная стойкость покрытий на изделиях, паянных погружением в расплавы солей; значительный расход солей (флюсов) и припоя; необходимость рафинирования расплавов жидких ванн от примесей.

Массивные детали из меди, вследствие ее большой теплопроводности, превышающей в шесть раз теплопроводность железа, паяют газовыми горелками [8 – 11]. Основными преимуществами являются низкие затраты на оборудование, а также возможность механизации и автоматизации процесса. Недостатки технологии газопламенной пайки – необходимость работы с открытым огнем, а также сложность осуществления низкотемпературной пайки, так как температура пламени горелки достигает 3150 °С. Единственным способом регулирования температуры в этом случае является увеличение и точное поддержание расстояния между горелкой и паяемыми поверхностями, что технически сложно реализуемо.

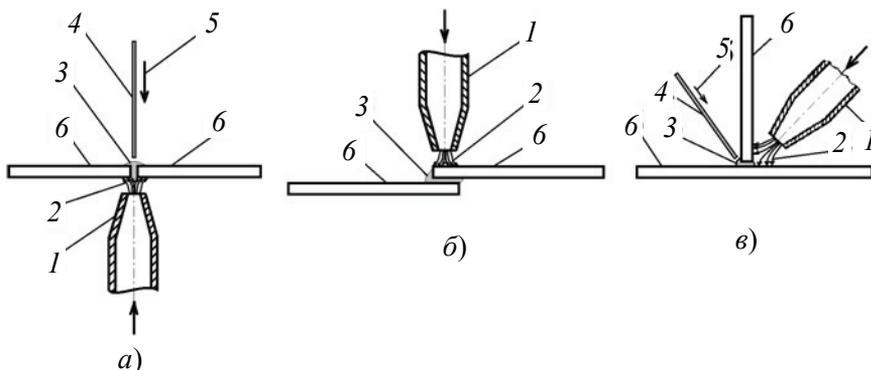
В электронике нашла применение технология пайки нагретым газом [12]. Паяемое изделие располагается в зоне выхода горячего газа. Тепловой режим пайки обеспечивается за счет изменения расхода газа и температуры нагревателя, а также скоростью перемещения паяемого изделия относительно паяльной головки. Узкая область применения пайки нагретым газом обусловлена отсутствием на российском рынке соответствующего технологического оборудования. В последние несколько лет в России развивается производство аппаратов горячего воздуха. В настоящее время такое оборудование успешно применяется для сварки полимеров. Основным преимуществом, позволяющим применять аппараты горячего воздуха для низкотемпературной пайки металлов, является наличие контура точного регулирования температуры, а также возможность доработки устройств с точки зрения применения в качестве теплоносителей защитных газов [13].

#### Материалы и методы исследований

При проведении исследований изготовлены образцы паяных соединений (ГОСТ 19249–73) пластин из меди МЗр толщиной 2 мм: ПВ-1 (стыковое), ПН-1 (нахлесточное), ПТ-1 (тавровое), схемы которых показаны на рис. 1.

Для получения соединений использовался аппарат горячего воздуха LST-1600S мощностью 1600 Вт, выходной диаметр сопла – 15 мм, температура газа на выходе сопла – 480 °С, расход воздуха 180 л/мин, расстояние от сопла до паяемых деталей – 10...30 мм.

В результате проведенных исследований [14] распределения температур на поверхности медной пластины в зависимости от режима функционирования аппарата горячего воздуха доказано, что при указанных выше параметрах область размером не менее 40×40 мм прогревается до температуры 240 °С в центре и 200 °С



**Рис. 1. Термовоздушная пайка медных пластин встык (а), внахлест (б), втавр (в):**  
 1 – сопло аппарата горячего воздуха; 2 – нагретый газ (воздух); 3 – паяный шов;  
 4 – пруток припоя; 5 – направление подачи припоя; 6 – паяемые детали

по краям, что позволяет осуществлять пайку низкотемпературными припоями. Чувствительность температуры на поверхности деталей к изменению длины свободного газового потока составляет 0,7 °С/мм, что существенно облегчает процесс пайки с точки зрения отсутствия необходимости точного поддержания расстояния от источника нагрева до паяемых поверхностей.

Пайка экспериментальных образцов осуществлялась оловянно-свинцовым припоем ПОС-61 в виде прутка диаметром 2 мм, представляющим собой сплав 61 % олова и 39 % свинца. Температура ликвидуса припоя составляет 190 °С, солидуса – 183 °С. Интервал кристаллизации сплава равен 7 °С и является наименьшим среди оловянно-свинцовых припоев. Временное сопротивление разрыву составляет 42 МПа (4,3 кгс/мм<sup>2</sup>).

Реализация технологии термовоздушной пайки предусматривает использование флюса. Флюс позволяет удалить оксидные пленки с поверхностей соединяемых деталей, защитить паяемые поверхности от окисления при нагреве, а также обеспечивает лучшую смачиваемость паяемых деталей припоем. Пайка экспериментальных образцов пластин из меди осуществлялась с помощью активного флюса на основе хлоридов цинка и аммония специально выбранного состава: ZnCl<sub>2</sub> (200 мг), NH<sub>4</sub>Cl (10 мг), H<sub>2</sub>O (0,79 мл). Данный флюс имеет температуру активации 150 °С и сохраняет свои защитные свойства вплоть до температуры 350 °С.

Пайка нахлесточного соединения предварительно луженых заготовок осуществлялась без дополнительного введения припоя. Лужение заготовок осуществлялось в следующей последовательности:

- нанесение кистью или тампоном флюса при комнатной температуре на поверхность, подлежащую пайке;
- выбор режима функционирования аппарата горячего воздуха, при котором обеспечивается нагрев поверхностей деталей на 30...50 °С выше температуры плавления припоя (220...240 °С);
- нагрев поверхностей потоком горячего воздуха с обратной стороны;
- нанесение припоя путем кратковременного касания нагретой поверхности.

Пайка стыковых и тавровых соединений может осуществляться как с применением предварительного лужения, так и без него. При этом обязательным является использование флюса. Технология получения стыковых и тавровых соединений в общем случае аналогична изложенной выше. Для формирования протяженных паяных швов необходимо проводить нагрев заготовок и нанесение припоя в следующей последовательности:

- предварительный прогрев всей или большей части паяемого участка до температуры 0,8...0,9 от температуры активации флюса (120...130 °С) (операция необходима для увеличения производительности процесса);
- перемещение газового потока на начало паяемого участка и нагрев области взаимодействия с обратной стороны шва до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 30...50 °С (220...240 °С);
- нанесение припоя путем кратковременного касания нагретой поверхности;
- перемещение аппарата горячего воздуха вдоль шва со скоростью 5...30 мм/с (выбирается в зависимости от толщины металла, его теплопроводности и выбранного режима функционирования аппарата горячего воздуха);
- формирование паяного шва с необходимыми геометрическими параметрами осуществляется одновременно с перемещением нагреваемой области путем введения необходимого количества припоя касанием прутка нагретой поверхности. Частота внесения припоя определяется диаметром используемого прутка, толщиной паяемых поверхностей и необходимыми геометрическими параметрами шва.

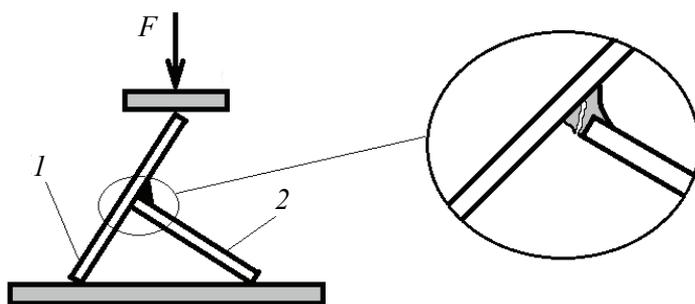


Рис. 2. Схема испытания на излом образцов таврового паяного соединения

Механические испытания образцов паяных соединений проводились на универсальной разрывной машине УТС-101-5 (скорость 20 мм/мин, тип датчика 5000 Н). Стыковые и нахлесточные соединения испытывались в режиме растяжения до полного разрушения образцов; тавровые соединения – по схеме, представленной на рис. 2, при работе машины в режиме сжатия.

### Результаты исследований и их обсуждение

Обработка результатов механических испытаний проводилась с использованием программно-технического комплекса Analyzer. Исследование поверхностей разрушения на наличие дефектов пайки осуществлялось путем обработки их микрофотографий в программе анализа данных микроскопии Gwyddion 2.63.

При анализе изломов паяных соединений выявлено, что преобладающим дефектом является непропай – частичное незаполнение паяльного зазора припоем, незначительная доля приходится на порообразование. В среде программы Gwyddion 2.63 осуществлена идентификация этих дефектов и определение их суммарной площади в отношении к общей площади паяного соединения.

На рисунке 3 представлены зависимости прочности при разрушении  $\sigma_B$  от относительной площади дефектов  $\delta S_D$  при пайке встык, внахлест и при пайке таврового соединения.

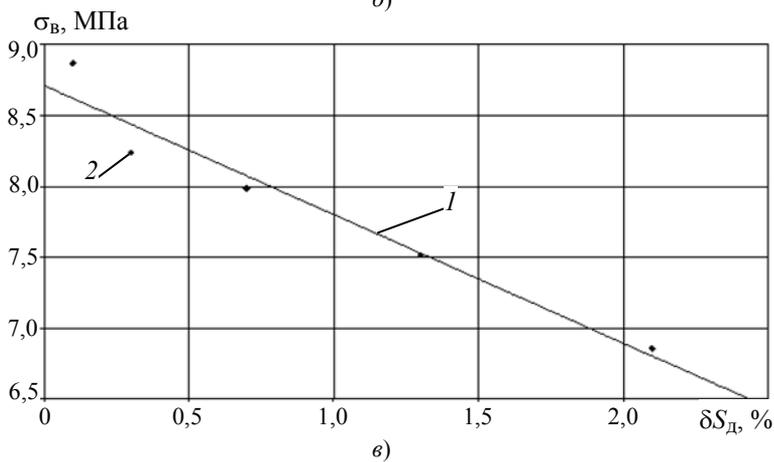
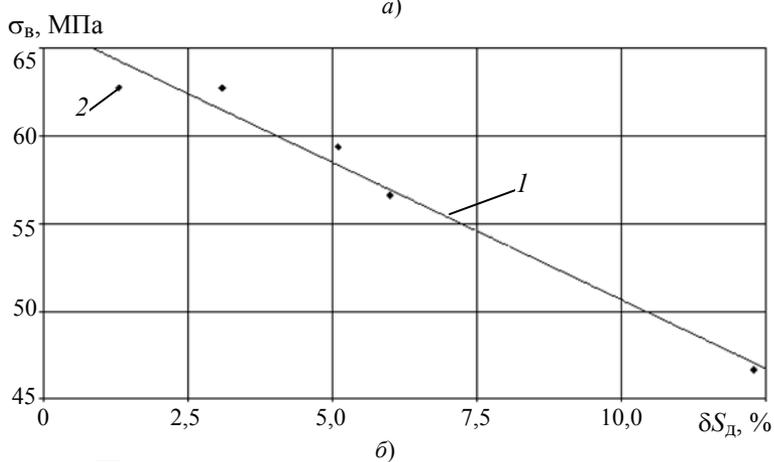
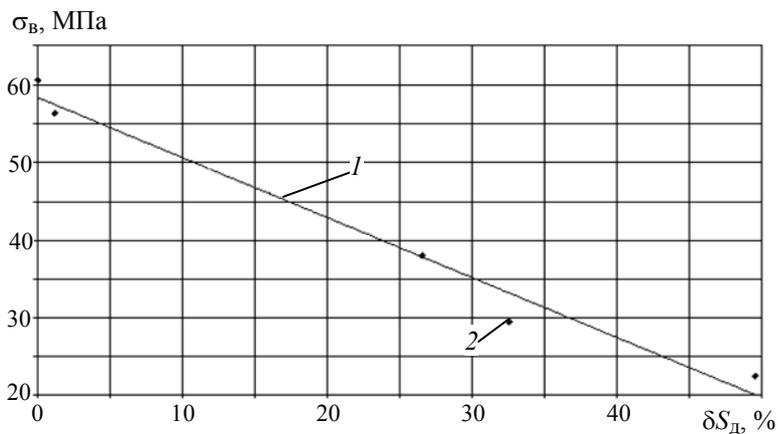
В результате аппроксимации экспериментальных данных полиномом первой степени получены следующие выражения при пайке:

- встык:  $\sigma_B = 58,37 - 0,77 \cdot \delta S_D, R^2 = 0,97$ ;
- внахлест:  $\sigma_B = 66,37 - 1,57 \cdot \delta S_D, R^2 = 0,97$ ;
- таврового соединения:  $\sigma_B = 8,71 - 0,91 \cdot \delta S_D, R^2 = 0,95$ .

Анализ полученных зависимостей показывает, что при изменении относительной площади дефектов на 1 % прочность при разрушении для различных видов соединения изменяется следующим образом:

- стыковое – на 1,3 %;
- нахлесточное – на 2,4 %;
- тавровое – на 10 %.

При растяжении стыкового паяного шва влияние дефектов типа «непропай» и «пора» на прочность шва наименьшее, что связано с особенностями формирования шва. При сборке деталей под пайку устанавливается определенный зазор, который в дальнейшем заполняется припоем. Прочность такого соединения в значительной степени определяется величиной прослойки припоя между поверхностями паяемых деталей. При растяжении шва, в условиях стесненной деформации, формируется жесткое объемное напряженное состояние, возникающее в шве, что обуславливает повышение прочности соединения.



**Рис. 3. Зависимость прочности при разрушении от относительной площади дефектов при пайке встык (а), внахлест (б), втавр (в):**  
 1 – аппроксимирующая зависимость; 2 – эксперимент

На прочность нахлесточных соединений наибольшее влияние оказывают не-пропаи по краям паяемой области, уменьшающие эффективную площадь нахлестки. Напряженное состояние в нахлесточном соединении неоднородно, на краях возникает концентрация напряжений, сдвиговые деформации максимальны, одна-

ко в силу структурной неоднородности шва, формирующейся при его кристаллизации, они практически не передаются в объем шва, и возможное наличие там пор оказывает слабое влияние на прочностные характеристики. Следует отметить, что влияние на прочность нахлесточного соединения оказывает наличие галтелей, которые снижают концентрацию напряжений на краю соединения.

Тавровое соединение деталей является одним из наиболее распространенных при создании различных конструкций. В отличие от стыковых и нахлесточных соединений, работающих преимущественно при растягивающих или сжимающих нагрузках, тавровое соединение может эксплуатироваться в широких условиях приложения усилий. При растягивающей нагрузке, которая приложена в направлении, перпендикулярном оси шва, тавровый шов работает аналогично стыковому. При выбранной в работе схеме испытания таврового соединения (см. рис. 2) зарождение трещины происходит с обратной стороны шва в непосредственной близости к детали 2. Таким образом, область концентрации напряжений смещается по мере раскрытия трещины в сторону шва, а на диаграмме нагружения появляется протяженная зона разрушения, ширина которой составляет 75...95 % от толщины паяемых пластин. Учитывая такой механизм разрушения таврового соединения, становится очевидной высокая чувствительность прочности к наличию дефектов, в том числе и внутренних.

### Заключение

В работе предложена технология термовоздушной низкотемпературной пайки крупногабаритных тонкостенных изделий из меди. С применением специально разработанного флюса получены образцы различных видов паяных соединений (стыковых, нахлесточных и тавровых), механические испытания которых показали их высокую прочность.

Анализ поверхностей разрушения паяных соединений позволил выявить дефекты, характерные для термовоздушной пайки. Осуществлена оценка влияния относительной площади этих дефектов на прочностные характеристики швов. Установлено, что наибольшее уменьшение прочности в зависимости от наличия дефектов характерно для тавровых швов, что связано с особенностями распределения напряжений в ходе их нагружения.

Отличительной особенностью рассмотренной технологии пайки является ее высокая производительность, точная установка и поддержание температуры нагрева, а также возможность автоматизации процесса.

Термовоздушная пайка может быть успешно применена для соединения любых материалов, при этом потребуется корректировка технологии с точки зрения режимных параметров и применяемых вспомогательных материалов (флюсов, паст, припоев).

*Работа выполнена в рамках программы конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года» управления образования и науки Тамбовской области, проект № МУ2022-02/27.*

### Список литературы

1. Борисенко, А. Б. Разработка конструкции установки химического никелирования, функционирующей в составе гальванической линии / А. Б. Борисенко, В. В. Храмцов, В. А. Немтинов, А. В. Крылов, М. А. Матрохин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 275 – 284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284
2. Вахрушев, О. SEHO. Печи конвекционной пайки для среднесерийного производства / О. Вахрушев // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 25 – 29.

3. Сизов, А. Конвекционные печи оплавления серии OmniFlex / А. Сизов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 28 – 30.
4. Власов, А. Печи для оплавления припоя RO300FC/C / А. Власов // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 5. – С. 41 – 43.
5. Zieger, B. E. High Temperature Brazing in Single Chamber Vacuum Furnaces / B. E. Zieger // Heat Processing. – 2016. – No. 3. – P. 104 – 108.
6. Иванов, Н. И. Исследование процесса пайки электросопротивлением медных проводов прямоугольного сечения / Н. И. Иванов, М. Ю. Карамышев // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – № 6 (39). – С. 71 – 77.
7. Пат. 2113945 Российская Федерация, МПК В23К 3/06, В23К 1/08. Линия пайки погружением в расплавленный припой / Лифтман И. Б., Швейковский Ю. И., Фроленко Б. Т., Гурвиц А. Э., Струнец В. К.; заявитель и патентообладатель АО «УралНИТИ». – № 96106876/02; завл. 20.07.1998; опубл. 27.06.1998.
8. Федоров, А. Л. Технология и оборудование низкотемпературной пайки : электрон. учеб. пособие / А. Л. Федоров. – Тольятти : Изд-во ТГУ. – 2021. 127 с. – 1 оптич. диск.
9. Merkblatt DVS 2602 (05/2016). Hartlöten mit der Flamme (DVS 2602), May 2016. URL : <https://www.dvs-regelwerk.de/regelwerke/merkblatt-dvs-2602-05-2016> (дата обращения : 30.09.2023).
10. Мордасов, М. Д. Исследование эффективности активных флюсов при лужении и пайке стали 12X18H10T / М. Д. Мордасов, М. Ю. Телешов, П. В. Игнатов, Д. М. Мордасов // Научно-технические и инженерные разработки – основа решения современных экологических проблем : материалы Юбилейной семидесятой Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. – Ярославль, 2017. – Ч. 2. – С. 325 – 328.
11. Мордасов, М. Д. Физико-химические основы низкотемпературной пайки стали 12X18H10T с медью / Д. М. Мордасов, Д. А. Черных, М. Д. Мордасов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018 : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Казань, 2018. – С. 344 – 346.
12. Новиковский, Е. А. Пайка металлов / Е. А. Новиковский. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2013. – 63 с.
13. Луконин, Н. В. Применение способа бесконтактной пайки для создания высоконадежных прецизионных соединений антенно-фидерных устройств космических аппаратов / Н. В. Луконин, О. А. Белов, Д. М. Доронкин, А. Н. Коробкин, И. Я. Шестаков // Исследования наукограда. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 144 – 150.
14. Мордасов, М. Д. Изучение взаимодействия потока горячего воздуха с медной пластиной / М. Д. Мордасов, Д. О. Завражин, Д. М. Мордасов // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы XIV Междунар. науч.-инновац. молодежной конф. – Тамбов, 2022. – С. 57 – 58.

### Thermal Air Soldering of Sized Thin-Walled Copper Products

D. M. Mordasov<sup>1</sup>, P. V. Monastyrev<sup>2</sup>, M. D. Mordasov<sup>1</sup>,  
A. F. Zubkov<sup>3</sup>, K. A. Andrianov<sup>3</sup>, V. A. Ezersky<sup>4</sup>

*Departments: “Materials and Technology” (1), [mit@tstu.ru](mailto:mit@tstu.ru);  
“Design of Buildings and Structures” (2); “City Construction and Highways” (3);  
“Architecture and Urban Planning” (4), TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** fracture analysis; solder seam defects; low temperature soldering; physical and mechanical tests; flux; ammonium chloride; zinc chloride.

**Abstract:** The technological features of low-temperature soldering of thin-walled copper products using heated gas (air) as a coolant are considered. Using the developed technology, experimental samples of butt, lap and tee solder joints were obtained. As a result of mechanical tests of solder joints, their high mechanical properties are shown. The dependence of the fracture strength on the relative area of defects during hot-air soldering of various joints was assessed and obtained.

### References

1. Borisenko A.B., Khramtsov V.V., Nemtinov V.A., Krylov A.V., Matrokhin M.A. [Development of the design of a chemical nickel plating plant operating as part of a galvanic line], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 275-284. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.275-284 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Vakhrushev O. [SEHO. Furnaces for convection soldering for medium-scale production], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronic industry], 2008, no. 3, pp. 25-29. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Sizov A. [OmniFlex series convection reflow ovens], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronic industry], 2007, no. 6, pp. 28-30. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Vlasov A. [Furnaces for solder reflow RO300FC/C], *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in the electronic industry], 2006, no. 5, pp. 41-43. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Zieger B.E. High Temperature Brazing in Single Chamber Vacuum Furnaces, *Heat Processing*, 2016, no. 3, pp. 104-108.
6. Ivanov N.I., Karamyshev M.Yu. [Study of the process of electrical resistance soldering of copper wires of rectangular cross section], *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern materials, equipment and technologies], 2021, no. 6(39), pp. 71-77. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Liftman I.B., Shveykovskiy Yu.I., Frolenko B.T., Gurvits A.E., Strunets V.K. *Liniya payki pogruzheniem v rasplavlennyy pripoy* [Hot dip soldering line], Russian Federation, 1998, Pat. 2113945 (In Russ.)
8. Fedorov A.L. *Tekhnologiya i oborudovaniye nizkotemperaturnoy payki: elektron. ucheb. posobiye* [Technology and equipment for low-temperature soldering: electron. textbook allowance], Tol'yatti: Izdatel'stvo TGU, 2021, 127 p. 1 optich. disk. (In Russ.)
9. Merkblatt DVS 2602 (05/2016). Hartlöten mit der Flamme (DVS 2602), May 2016. available at: <https://www.dvs-regelwerk.de/regelwerke/merkblatt-dvs-2602-05-2016> (accessed 30 September 2023).
10. Mordasov M.D., Teleshov M.Yu., Ignatov P.V., Mordasov D.M. *Nauchno-tekhnicheskiye i inzhenernyye razrabotki – osnova resheniya sovremennykh ekologicheskikh problem : materialy Yubileynoy semidesyatoy Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov i aspirantov s mezhdunar. uchastiyem* [Scientific and technical and engineering developments as the basis for solving modern environmental problems : materials of the 70th Anniversary All-Russia. sci.-tech. conf. students, undergraduates and graduate students from the Intern. participation], Yaroslavl', 2017, Part 2, pp. 325-328. (In Russ.)
11. Mordasov M.D., Chernykh D.A., Mordasov M.D. *Innovatsionnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i materialy – 2018: materialy IX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative engineering technologies, equipment and materials - 2018: materials of the IX Intern. sci.-tech. conf.], Kazan', 2018, pp. 344-346. (In Russ.)
12. Novikovskiy Ye.A. *Payka metallov* [Soldering of metals], Barnaul: Izdatel'stvo AltGTU, 2013, 63 p. (In Russ.)

13. Lukonin N.V., Belov O.A., Doronkin D.M., Korobkin A.N., Shestakov I.Ya. [Application of the contactless soldering method to create highly reliable precision connections of antenna-feeder devices of spacecraft], *Issledovaniya naukograda* [Science City Research], 2017, vol. 1, no. 3, pp. 144-150. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Mordasov M.D., Zavrazhin D.O., Mordasov D.M. *Sovremennyye tverdofaznyye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyy menedzhment: materialy XIV Mezhdunar. nauch.-innovats. molodezhnoy konf.* [Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovation management: Proceedings of the XIV Intern. scientific-innovative youth conf.], Tambov, 2022, pp. 57-58. (In Russ.)

---

### **Thermisches Luftlöten der übergroßen dünnwandigen Kupferprodukte**

**Zusammenfassung:** Es sind die technologischen Merkmale des Niedertemperaturlötens dünnwandiger Kupferprodukte unter Verwendung von erhitztem Gas (Luft) als Wärmeträger betrachtet. Mithilfe der entwickelten Technologie sind experimentelle Proben von Stoß-, Überlappungs- und T-Lötverbindungen erhalten. Als Ergebnis mechanischer Tests von Lötverbindungen sind deren hohe mechanische Eigenschaften nachgewiesen. Die Abhängigkeit der Bruchfestigkeit von der relativen Defektfläche beim Heißluftlöten verschiedener Verbindungen ist bewertet und ermittelt.

---

### **Brasage à l'air chaud des produits en cuivre à paroi mince**

**Résumé:** Sont examinées les caractéristiques technologiques du brasage à basse température des produits à paroi mince en cuivre avec l'utilisation d'un gaz chauffé (air) comme support thermique. En utilisant la technologie développée, sont reçus des échantillons expérimentaux de joints de soudure bout à bout, de recouvrement et de marque. À la suite des tests mécaniques des joints de soudure, sont montrées leurs propriétés mécaniques élevées. Est réalisée l'évaluation et sont obtenues les dépendances de la résistance à la rupture sur la surface relative des défauts lors du brasage à l'air chaud de divers composites.

---

**Авторы:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Монастырев Павел Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Мордасов Михаил Денисович* – ассистент кафедры «Материалы и технология»; *Зубков Анатолий Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»; *Андреанов Константин Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги»; *Езерский Валерий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.