

Методика построения ультразвуковой системы установки термозвуковой сварки методом «шарик–клин»

И. Б. Петухов^{а,*}, В.Л. Ланин^{б,**}

^аОАО «Планар-СО», г. Минск, 220033, Республика Беларусь,

*e-mail: petuchov@kbtem.by

^бБелорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

г. Минск, 220013, Республика Беларусь,

**e-mail: vlanin@bsuir.by

Поступила в редакцию 24.04.2025

После доработки 06.06.2025

Принята к публикации 09.06.2025

Предложена методика построения ультразвуковой системы, определяющая стабильность термозвуковой микросварки золотой проволоки диаметром 17,5–50 мкм при сборке изделий электроники в металлокерамических корпусах. Проведено моделирование волновода на стандартной частоте ультразвуковых колебаний 66 кГц и повышенной частоте 136 кГц.

Ключевые слова: проволочный монтаж, металлокерамические корпуса, ультразвуковая/термозвуковая микросварка, ультразвуковой преобразователь, волновод, скорость звука, сварочный капилляр

УДК 621.791.16

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.3.45>

ВВЕДЕНИЕ

Термозвуковая сварка золотой проволоки диаметром 17,5–50 мкм для формирования межсоединений между контактными площадками кристалла и выводами корпуса, традиционно используемая на ленточных носителях ввиду возможности высокой автоматизации и производительности процесса, в последнее время активно стала применяться при сборке изделий в металлокерамических корпусах и однокристалльных и многокристалльных модулей (рис. 1) с обеспечением ряда ключевых преимуществ, делающих их востребованными в высоконадежных изделиях для авиакосмического, военного применения и промышленного оборудования. Металлокерамика позволяет создавать полностью герметичные корпуса, защищающие от влаги, пыли, газов и коррозии. Такая защита повышает надежность в агрессивных средах и условиях ионизирующего излучения. Согласованный коэффициент теплового расширения металлокерамики с другими материалами микросхем минимизирует деформации при температурных перепадах, сохраняя целостность межсоединений. При использовании подложек-интерпозеров при создании многокристалльных модулей возможно применение технологии флип-чип монтажа для объединения нескольких кристаллов в одну систему в корпусе [1]. Сочетание прочности, термостойкости и устойчивости к внешним факторам увеличивает срок службы компонентов, снижая частоту отказов в критических системах телекоммуникационной и высококачественной электроники, промышленной автомати-

зации и энергетики. К недостаткам металлокерамических корпусов относится более высокая стоимость их производства, в частности сложности автоматизации сборки корпусов малых размеров (порядка 5×5 мм), но их преимущества перевешивают затраты в критически важных применениях.

ПРОЦЕСС ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКИ

В настоящее время монтаж золотых проволочных выводов диаметром от 17,5 до 50 мкм в основном осуществляется с помощью термозвуковой микросварки методами «клин–клин» и «шарик–клин» с подогревом рабочей зоны от 180 до 230 °С, приложением заданного усилия к формируемому соединению «проволока–контактная площадка» и одновременным вводом ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой в диапазоне 60–140 кГц через рабочий инструмент [2]. При монтаже изделий в металлокерамических корпусах также используются методы присоединения кристаллов по технологии флип-чип с предварительным формированием присоединенных шариков (бампов) на контактные площадки кристалла или корпуса. При этом заблаговременно производится оптическое совмещение перевернутой вниз активной поверхности кристалла и контактных площадок корпуса. После совмещения осуществляются опускание кристалла на контактные площадки корпуса с последующим приложением заданного усилия к кристаллу и ввод ультразвуковых колебаний, при этом объемные выводы соединяются с контактными площадками,

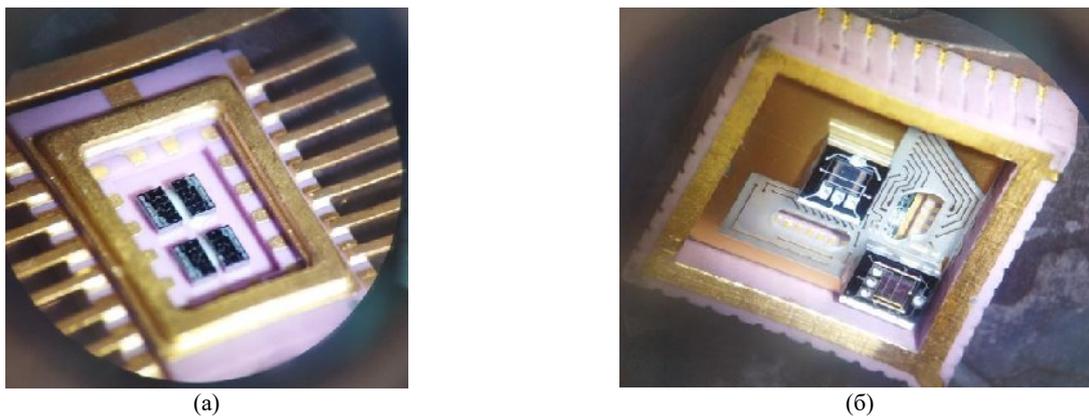


Рис. 1. Образцы металлокерамических корпусов.

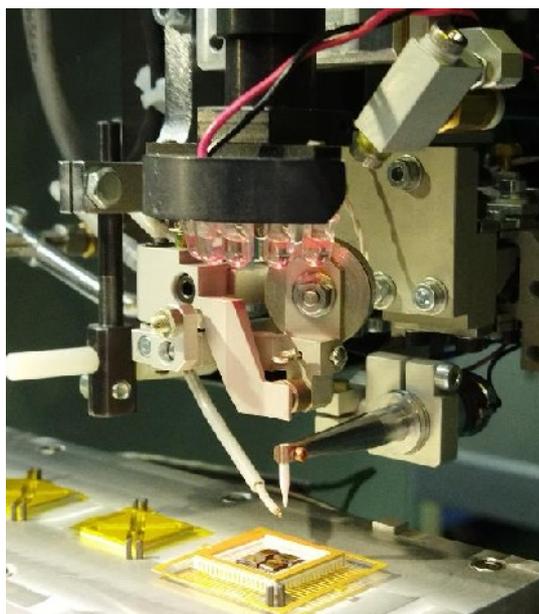


Рис. 2. Сварочная головка для термозвуковой сварки золотой проволокой с вертикальным приводом перемещения.

образуя межсоединения между контактными площадками кристалла и корпуса. Монтаж производится при нагреве рабочей зоны до 200 °С.

Процесс термозвуковой микросварки золотой проволоки методом «шарик–клин» в технологическом плане задается следующими параметрами: режимом формирования шарика на конце золотой проволоки, температурой рабочей зоны монтажа, амплитудой УЗ колебаний микросварочного инструмента (капилляра), контактным усилием (нагрузением) системы «торец капилляра–проволока (кристалл при флип-чип монтаже)–контактная площадка» и временем сварки. Очевидно, что чем тоньше используемая проволока, тем точнее должны задаваться исходные параметры и поддерживаться в процессе присоединения. Применение тонкой проволоки <math><20\text{ мкм}</math> связано в первую очередь с размерами контактных площадок кристаллов <math><60\times 60\text{ мкм}</math>, а значит, и малой площадью соединения. Для 2,5D изделий в

металлокерамических корпусах с заложенной в конструкцию прибора высокой разностью уровней сварки необходимо обеспечивать вертикальное положение микросварочного инструмента на позиции присоединения. Это может быть обеспечено перемещением сварочной головки (рис. 2) по вертикальной оси Z.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА МИКРОСВАРКИ

Основной частью любой ультразвуковой установки является ее ультразвуковая система, состоящая из ультразвукового генератора (УЗГ), ультразвукового преобразователя (УЗП) и сварочного микроинструмента, зажатого клеммным зажимом в торце волновода УЗП. Конструктивные особенности ультразвукового преобразователя определяют его резонансную частоту, на которой к нему от УЗГ подводится переменный электрический сигнал заданной амплитуды и длительности. УЗП преобразует

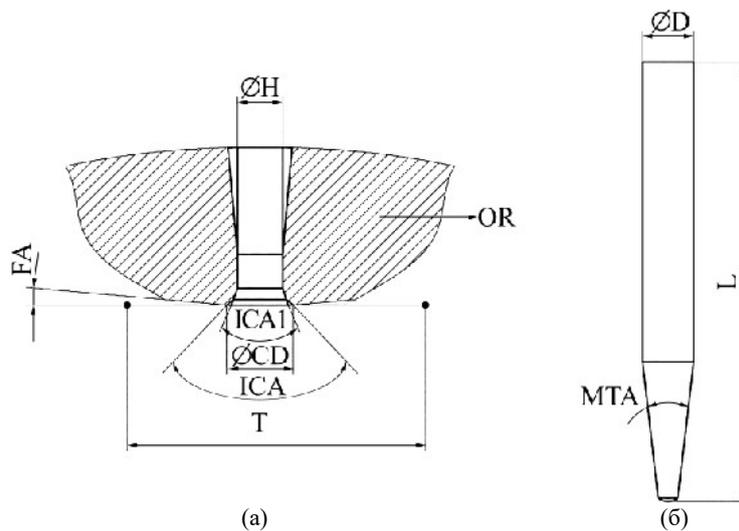


Рис. 3. Рабочий торец микросварочного капилляра (а) и его общий вид (б).

подводимые электрические колебания в механические на основе обратного пьезоэффекта. Диапазон рабочих частот современных ультразвуковых установок достаточно широкий: от 55 до 140 кГц, при этом выбор резонансной частоты определяется конструкцией сварочной головки и эффективностью передачи ультразвуковой энергии в зону присоединения. Под этим понятием подразумеваются точность настройки и работы ультразвуковой системы на резонансе УЗП, низкий импеданс (<20 Ом) и высокая добротность в диапазоне 600–900 с установленным (зажатым в клеммный зажим) микроинструментом. Достижение данных параметров является сложной технологической задачей, включающей этапы от выбора материалов конструкции до расчетов и изготовления.

Микросварочный капилляр (микроинструмент) (рис. 3) играет важную роль в термозвуковом присоединении золотой проволоки. Он обеспечивает точную и надежную сварку проволоки с контактными площадками прибора. Капилляр представляет собой иглу (рис. 3б) со сквозным отверстием из керамики Al_2O_3 диаметром $D = 1,59$ мм и длиной L из ряда 9,5; 11,1; 12; 16 и 19 мм. Длина выбирается исходя из необходимой глубины проникновения в изделие, например, если контактные площадки находятся в глубоком колодце. Стандартными считаются капилляры длиной 11,1 и 16 мм. Рабочий торец капилляра (рис. 3а) определяет форму и размер сварного соединения типа «шарик» и «клин» и выбирается строго под заданный диаметр присоединяемой проволоки. Внешний угол рабочего торца FA для стандартных задач выбирается 4 или 8 градусов, угол внутренней фаски ICA – 90 или 120 градусов. Угол заточки капилляра MTA обычно выбирается 20 или 30 градусов.

Для нестандартных задач, таких как присоединение золотой, медной и алюминиевой проволоки методом «клин–клин» с использованием сварочной головки на рис. 2, нужно использовать угол рабочего торца FA 0 градусов, то есть плоский торец, для обеспечения необходимых прочности и внешнего вида соединения. В данном случае (при монтаже проволоки по методу «клин–клин») режим формирования шарика на конце проволоки деактивируется и вместо этого формируется после второго соединения подогнутый под рабочий торец капилляра кончик проволоки, так называемый «хвостик», программируемой длины. Алгоритмы отрыва проволоки от места второй сварки (после формирования петли) и подгибки «хвостика» под торец могут быть разными, но важным моментом здесь является направление подгибки «хвостика», который всегда должен быть соосным с монтируемой петлей (проволочным стежком). Вероятным решением может быть возможность вращения сварочной головки вокруг своей оси.

Выбор необходимого капилляра осуществляется из каталога производителей, например, таких как SPT [3], MicroPoint [4], GaiserTool [5], которые являются лидерами в изготовлении микросварочных капилляров, инструментов монтажа кристаллов, расходных материалов и дополнительной оснастки. При выборе капилляра, особенно по его длине, надо иметь в виду следующее. Капилляр зажимается в торец волновода, поэтому нужно быть уверенным после его установки в правильном согласовании с УЗП, поскольку капилляр является в данном случае нагрузкой УЗП.

При проектировании волновода УЗП придерживаются следующей методики.

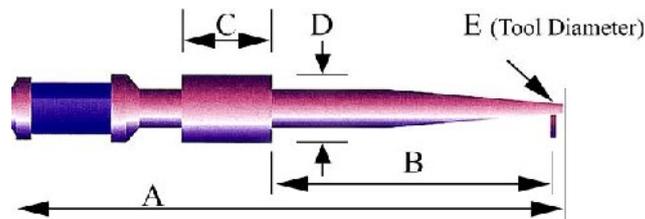


Рис. 4. Общий вид ультразвукового преобразователя для термозвуковой сварки.

Поскольку определяющей в расчетах является скорость распространения звука в выбранном материале, например, углеродистой стали, алюминии или титане, то важно знать, какую скорость выбрать из справочных данных. В справочниках часто приводятся скорости продольных волн, которые относятся к объемным телам, радиальные размеры которых намного больше длины звуковой волны. В волноводах УЗП для микросварки тонких проводников распространение ультразвуковых волн проходит по достаточно тонким стержням (или составным частям волновода) диаметром 6–7 мм. Поэтому скорость звука существенно ниже справочных значений из-за влияния эффекта Пуассона.

Как приведено в [6], для тонких стержней применяется следующая формула для расчетной скорости звука:

$$v_{\text{прод.тонк.}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{прод.тонк.}}$ – скорость звука продольных колебаний (м/с); E – модуль Юнга (ГПа); ρ – плотность материала (кг/м³).

Типичные значения для стали: $E = 200\text{--}210$ ГПа, $\rho = 7850\text{--}8000$ кг/м³, $v_{\text{прод.}} \sim 5000$ м/с. Скорость звука для толстых стержней увеличивается за счет коэффициента Пуассона ($\nu = 0,3$ для стали):

$$v_{\text{прод.толст.}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (2)$$

Подставляя вышеприведенные значения для стали, получаем значение $v_{\text{прод.толст.}} = 5800$ м/с. Именно это значение определяется при измерении толщиномером мод. Smartor фирмы SUIU [7] на цилиндрических образцах стали диаметром 20 мм и длиной 60 мм. Для усредненных расчетов можно использовать эмпирическое соотношение для определения скорости звука в волноводе с переменным сечением (конусной части) диаметром от 4 до 15 мм:

$$v(d) = v_{\text{прод.тонк.}} + \left(\frac{v_{\text{прод.толст.}} - v_{\text{прод.тонк.}}}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}} \right) (d - 4). \quad (3)$$

Таким образом, можно определить расчетную скорость звука под нужный диаметр стержня d . Для волновода диаметром 6 мм при $d_{\text{max}} = 15$ мм и $d_{\text{min}} = 6$ мм из (3) следует, что скорость звука в волноводе диаметром 6 мм равна 5175 м/с. Окончательную проверку рекомендуется проводить методом конечных элементов с применением программного обеспечения типа Comsol Multiphysics [8], FEMtools Multiphysics [9].

При разработке ультразвуковой системы может возникнуть следующая задача: возможно ли использование волновода УЗП для частоты 66 кГц в ультразвуковой системе повышенной частоты, например, в диапазоне от 110 до 140 кГц при сохранении размера волновода от места его крепления до торца (размер B на рис. 4). Также важно сохранение размеров C и D . Общая длина A может быть изменена. При данных требованиях необходимо, чтобы положение цилиндрического держателя волновода C находилось в узловой точке стоячей волны. Значит, от точки положения держателя C необходимо нечетное число отрезков $\lambda/4$ до места зажима инструмента, считая точку положения держателя C в узле (для минимизации утечки ультразвуковых колебаний в держатель УЗП). Учитывая выражение (3), $1/4$ длины волны $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ можно вычислить следующим образом:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{v(d)}{4f}, \quad (4)$$

где f – частота резонанса УЗП; $v_{\text{прод.тонк.}}$ – скорость звука в волноводе, вычисляемая из (3).

Таким образом, вычисляется частота, при которой от положения держателя C до торца волновода укладывается нечетное число четвертей длины волны, при условии положения держателя C в узле. Удобно проанализировать распределение узлов и пучностей волновода на стандартной частоте 66 ± 2 кГц. На рис. 5 показано распределение узлов и пучностей стандартного волновода на 67 кГц. Длина части волновода B равна приблизительно 62,5 мм.

Число четвертей от узла крепления держателя C равно трем, и держатель C находится в узле,

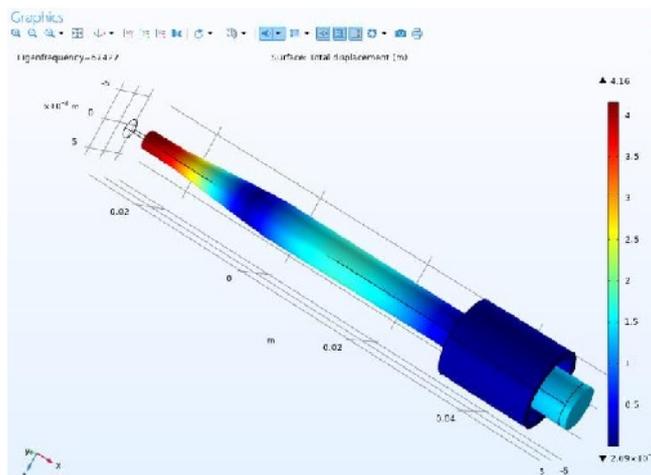


Рис. 5. Модель ультразвукового волновода на резонансной частоте 67,4 кГц.

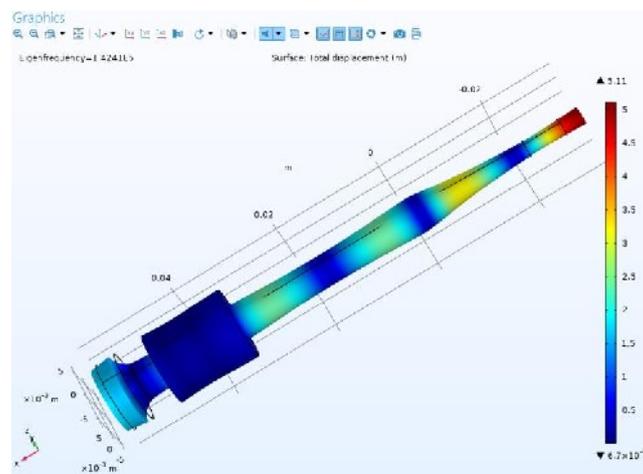


Рис. 6. Модель ультразвукового волновода на резонансной частоте 142,4 кГц.

что соответствует расчетным значениям из (3) и (4).

Рассмотрим возможность использования данного волновода на более высокой резонансной частоте за счет изменения длины задней части волновода. На рис. 6 показан волновод с удлиненной на 4,5 мм задней частью, причем торец дополнительной накладки находится в пучности ультразвукового полуволнового излучателя. На частоте 142 кГц выполняется условие положения держателя C в узловой точке, а число четвертей волны от держателя C до зажима микроинструмента в пучности стоячей волны равно 7, что также соответствует расчетам на основе (3) и (4).

СОГЛАСОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ С ИНСТРУМЕНТОМ

Для оценки согласования системы «УЗП–микросварочный капилляр» на резонансной частоте придерживаются следующей методики. С помощью векторного анализатора импеданса снимают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) УЗП с изменением импеданса в районе резонансной частоты. Затем снимают АЧХ с

зажатым капилляром в волноводе и добиваются минимального расхождения импеданса и резонансной частоты УЗП без капилляра и с установленным капилляром. Возможно, при этом придется выбрать положение капилляра в волноводе (выше или ниже), так называемый вылет. Данную операцию рекомендуется выполнять с капиллярами других производителей, а также при проблемах стабильности сварочного процесса. Данная процедура не требует разборки сварочной головки и проводится достаточно оперативно. Типовые характеристики УЗП установки ЭМ-4550 в исполнении для термозвуковой сварки производства ОАО «Планар-СО» с установленным инструментом показаны на рис. 7. Используемый капилляр имеет длину 11,1 мм и верхнюю часть, установленную заподлицо с волноводом. Из рис. 7 видно, что изменение параметров УЗП незначительное как на резонансной частоте $F_s \sim 66,6$ кГц с импедансом $RI \sim 9,6$ Ом, так и на резонансной частоте $F_s \sim 136,1$ кГц с импедансом $RI \sim 7,6$ Ом, что говорит о хорошем согласовании системы «УЗП–капилляр». Из практического опыта следует, что существенными изменениями можно считать изменения частоты резонанса при

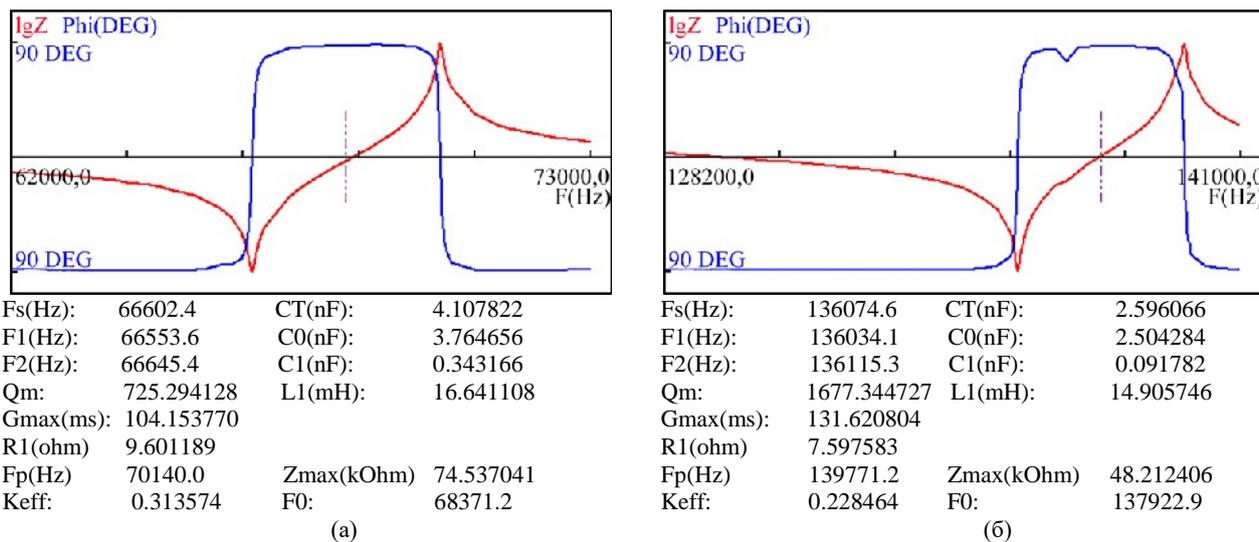


Рис. 7. Параметры УЗП с частотой резонанса 66,7 кГц (а) и 136,1 кГц (б).



Рис. 8. Вид клинового соединения золотой проволоки диаметром 25 мкм на установке ЭМ-4550.

установке микроинструмента на 2 и более кГц, импеданса – в 1,5 и более раз.

На приведенных диаграммах могут быть замечены побочные резонансы (в случае их наличия), которые могут создавать проблемы со стабильностью работы сварочной системы. Таким образом, данная процедура является оперативной диагностикой сварочной системы.

Формирование межсоединений в многокристалльных приборах – достаточно сложная задача, что связано с большим числом выводов и, соответственно, малым шагом между ними, значительной разновысотностью, соединениями различной длины и высоты.

Критерием качества присоединения золотой проволоки диаметром 17,5–50 мкм на установке ЭМ-4550 производства ОАО «Планар-СО» является стабильность образования клинового соединения, поскольку, помимо самого клинового соединения, в этом месте формируется второе соединение – для образования «хвостика» проволоки и последующего его оплавления в шарик [10]. Данное соединение образуется внутренней фаской микроинструмента ИСА (рис. 3). Стабильность процесса

достигается точностью работы координатной системы, правильным выбором геометрии рабочего торца и параметрами ультразвуковой системы (согласованием выходного импеданса ультразвукового генератора с импедансом УЗП и его добротностью). Внешний вид полученных клиновых соединений при сборке изделий в металлокерамических корпусах показан на рис. 8. При этом наблюдается стабильное соединение проволоки внутренней фаской микроинструмента (в виде темного полумесяца), что доказывает стабильность сварочного процесса при температуре рабочей зоны 180 °С. Тесты на прочность полученных проволочных соединений золотой проволокой диаметром 25 микрон методом тянущего усилия показывали прочность 6–7 г при сборке 8-выводных приборов в количестве 300 шт. в автоматическом режиме и в достаточно широком диапазоне рабочих режимов: усилие на первой сварке 30–37 г, мощность, подводимая к УЗП, – 1,1–1,3 Вт, время сварки – 12–16 мс. Для второй точки соединения (клиновой) усилие на второй сварке составляло 75–80 г, мощность – 1,5–1,6 Вт, время сварки – 15–20 мс. Частота ультразвуковых

колебаний составляет 66 кГц и 136 кГц, причем повышенная частота рекомендуется при пониженной температуре рабочей зоны (< 210 °С).

ВЫВОДЫ

1. При расчете геометрии волновода ультразвукового преобразователя для термозвуковой сварки тонких золотых проводников необходимо учитывать скорость распространения ультразвуковых колебаний в волноводе при диаметре волновода от 6 до 8 мм и обеспечивать точное расположение держателя волновода в узле стоячей волны.

2. Экспериментально установлено, что на повышенной частоте ультразвуковых колебаний 136 кГц можно использовать волновод с частотой 66 кГц, с правильно рассчитанным пьезоизлучателем (источником ультразвуковых колебаний), обеспечивающий необходимое положение держателя волновода в узле стоячей волны как на частоте 66 кГц, так и на частоте 136 кГц и высокое качество проволочного монтажа при температуре рабочей зоны 189–200 °С.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Достанко, А.П., Аваков, С.М., Голосов, Д.А., Емельянов, В.В., и др., *Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники*. Минск: Беларуская навука, 2020. 260 с.
2. Петухов, И.Б., Ланин, В.Л., Емельянов, В.А., *Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники*. Минск: Интегралполиграф, 2021. 186 с.

3. Small Precision Tools.

<https://www.smallprecisiontools.com/en/homepage/?oid=55&lang=en>

4. Micro Point Pro Ltd (MPP). <https://mpptools.com/>

5. Gaiser. Precision Bonding Tools. Catalog. <https://studylib.net/doc/25240729/gaiser-catalog>

6. Krautkramer, J. and Krautkramer H., *Ultrasonic Testing of Materials*. New York: Springer-Verlag, 1990. 677 p.

7. Smartor. Digital Ultrasonic Flaw Detector & Thickness Gauge <http://www.siui.com/ax0/a/chanpinzhongxin/wusunjiance/20171212/223.html>

8. Программное обеспечение COMSOL®. Комплексная платформа для физического моделирования, проектирования и развертывания приложений. https://cdn.comsol.com/resources/pdf-offers/ManagersGuide_2015_ru.pdf

9. FEATool Multiphysics. Physics Simulation Made Easy. <https://www.featool.com/?srsltid=AfmBOooIC2elpHodrECXEd8nWjat0Ks3E0m4nyv8Cm7e-P58ZTTGEVjF>

10. Достанко, А.П., Бордусов, С. В., Голосов, Д.А., Завадский, С.М., и др., *Технологии субмикронных структур микроэлектроники*. Минск: Беларуская навука, 2018. 270 с.

Summary

A methodology for designing an ultrasonic system is proposed, which provides the stability of thermosonic gold wire bonding with a diameter of 17.5–50 μm during the assembly of electronics devices in cermet. Modeling of the waveguide was carried out at the standard frequency of ultrasound of 66 kHz and an increased frequency of 136 kHz.

Keywords: wire bonding, cermet circuit packaging, ultrasonic/thermosonic micro bonding, ultrasonic transducer, transducer horn, sound speed, bonding capillary