УДК 621.791.3

И. В. Тарасенко, канд. техн. наук, доц., В. В. Десятник, канд. техн. наук, доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОСТИ ПАЯЛЬНЫХ ФЛЮСОВ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ МЕДИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся циклической прочности соединений, паянных низкотемпературными припоями. На примере нового состава флюса для низкотемпературной пайки меди показано, что повышение активности флюса, определяемое площадью растекания припоя ПОС 61 по образцам из М1, обеспечивает увеличение циклической прочности паяных соединений не менее чем на 10…15 %.

Циклическая прочность является важной характеристикой работоспособности паяных соединений. Все исследования, касающиеся циклической прочности паяных соединений и факторов, влияющих на нее, относятся к высокотемпературной пайке. Поведение же соединений, паянных припоями с низкой температурой плавления, при нагружении циклическими нагрузками мало освещается в технической и патентной литературе.

Для изучения влияния активности паяльных флюсов на циклическую прочность паяных соединений были проведены сравнительные испытания на циклическую прочность по полной программе и ускоренные испытания по методу Локати.

Классическим вариантом обоснования технологических решений при определении характеристик сопротивления усталости является проведение испытаний на циклическую прочность по так называемой полной программе, согласно которой минимально необходимое число образцов для получения характеристик сопротивления усталости и их достоверной статистической обработки должно быть не менее 12…16, т. е. по три–четыре образца на три–четыре уровня нагружения [1]. Это связано с большим временным объемом испытаний.

При определении условий испытаний на циклическую прочность по полной программе принципиальными являются вопросы о базе испытаний и частоте нагружения. Многочисленными испытаниями на циклическую прочность сварных соединений, проведенными в различных организациях, были получены так называемые пороговые значения, отделяющие нагружения на резонансных частотах, которые, как правило, не допускаются в практике эксплуатации, от частот нагружения, присущих сварным конструкциям. Однако для паяных соединений, в силу их податливости, связанной с низким модулем упругости припоев, такого рода данные практически отсутствуют. Кроме того, изначально не была ясна база испытаний. Обширный опыт, накопленный в области испытаний на циклическую прочность сварных образцов, показывает, что за базу испытаний принимается $2\cdot10^6\ldots2\cdot10^7$ циклов [1, 2]. В [1] установлено, что при изменении частоты нагружения от 30 до 300 циклов в минуту наблюдается изменение долговечности в 2…2,5 раза. При дальнейшем увеличении частоты нагружения долговечность остается постоянной. Таким образом, было принято решение за базу испытаний принять $2\cdot10^6\ldots2\cdot10^7$ циклов, а частоту нагружения – 1000 циклов в минуту при симметричном, т. е. наиболее опасном цикле нагружения.

Нами была выбрана схема нагружения: консольный изгиб с вращением, которая приведена на рис. 1, для чего были разработаны и изготовлены конструкции паяных образцов (рис. 2.) [3]. Для построения семейства кривых усталости с различной вероятностью неразрушения испытаниям подвергалось

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

12 «базовых» паяных образцов из меди М1, полученных с использованием припоя ПОС 61 и известного канифольно-спиртового флюса (канифоль – 30 %, этиловый спирт – остальное). Результаты испытаний приведены в табл. 1.

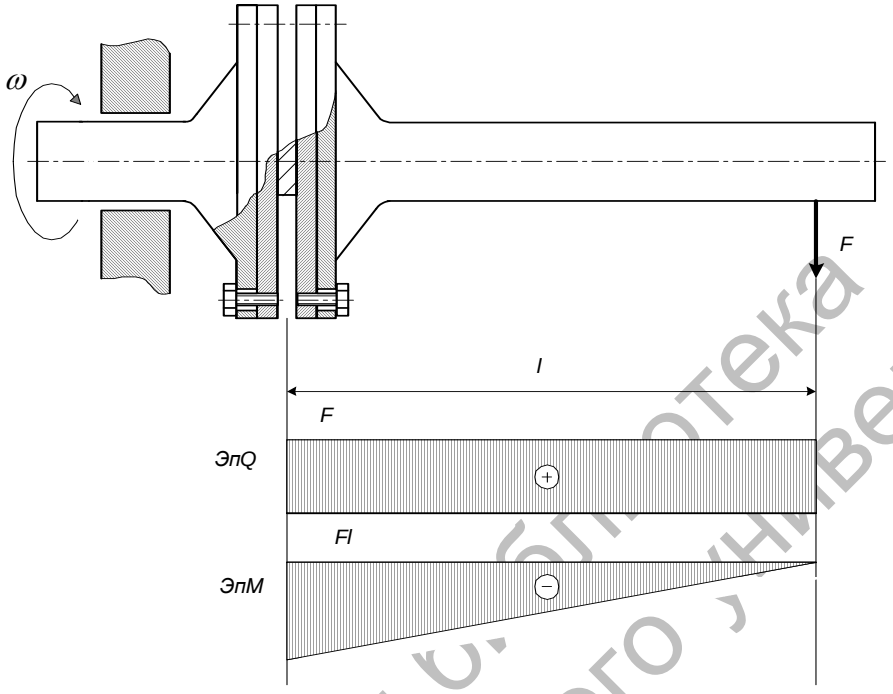

Рис. 1. Схема нагружения паяных образцов при определении циклической прочности методом изгиба с вращением

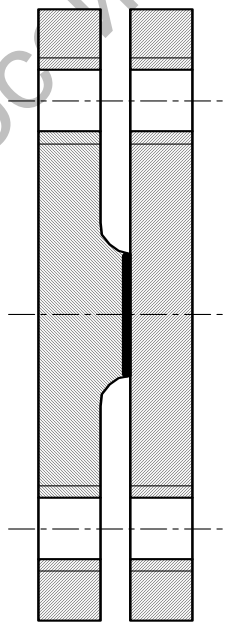

Рис. 2. Образец для определения циклической прочности

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Табл. 1. Результаты испытаний «базовых» паяных образцов

Номер образца	σ_{max}, МПа	Число циклов до разрушения N_i	lgN_i	$(lgN_i)^2$	$LgN_i \cdot \sigma_{max}$	σ^2_{max}
1	19	22 000	4,34	18,83	82,46	361
2	19	26 000	4,41	19,45	83,79	361
3	19	27 500	4,43	19,62	84,17	361
4	16	54 000	4,73	22,37	75,68	256
5	16	100 000	5	25	80	256
6	16	160 000	5,2	27,04	83,2	256
7	14	170 000	5,23	27,35	73,22	196
8	14	300 000	5,47	29,92	76,58	196
9	14	350 000	5,54	30,69	77,56	196
10	12	2 100 000	6,32	39,94	75,84	141
11	11	1 000 000	6	36	66	121
12	9	2 000 000	6,3	39,69	56,7	81
$\sum_1^n$	179	6 309 500	62,97	9587,96	837,64	2782
$\frac{1}{n}\sum_1^n$	14,9	525 721	5,24	24,66	69,8	231,8

В общем виде уравнение семейства усталостных кривых с различной вероятностью неразрушения P_H имеет вид [1]:

$$\lg N = \left[|m_{50}| + K_B \cdot S_m\right] \times$$
$$\times \left(\sigma - \overline{\sigma}\right) + \left(\overline{\lg N} + K_B \cdot S_{Nr}\right), \quad (1)$$

где m_{50} – показатель наклона кривой усталости с вероятностью неразрушения P_H = 50 %; K_B – коэффициент, соответствующий различной вероятности неразрушения; S_{Nr} – условное основное отклонение lgN; S_m – условное отклонение показателя наклона усталостной кривой.

Коэффициент K_B определяют с помощью функции Лапласа и для P_H = 0,1 % K_B = 3,32; P_H = 50 % K_B = 0; P_H = 99,9 % K_B = -3,32.

Условное основное отклонение lgN и основное отклонение показателя наклона определяются по формулам [2]:

$$S_{Nr} = S_{lg\,N} \cdot \sqrt{1 - r^2}\,; \quad (2)$$

$$S_m = \frac{S_{lgN}}{S_\sigma} \cdot \sqrt{\frac{1-r^2}{n}}\,, \quad (3)$$

где S_{lgN} – среднеквадратичное отклонение lgN; r – коэффициент корреляции; S_σ – среднеквадратичное отклонение σ_{max}; n – число испытанных образцов.

Коэффициент корреляции r вычисляется по формуле

$$r = |a| \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \sum_1^n (\lg N_i)^2 - \left(\sum_1^n \lg N_i\right)^2}{n \cdot \sum_1^n (\sigma_{max\,i})^2 - \left(\sum_1^n \sigma_{max\,i}\right)^2}}. \quad (4)$$

Среднеквадратичное отклонение σ_{max} определяется из выражения

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

$$S_{\sigma\max} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\left[\sum_1^n\left(\sigma_{\max i}\right)^2 - \frac{\left(\sum_1^n \sigma_{\max i}\right)^2}{n}\right]}. \quad (5)$$

Обработка результатов по методу наименьших квадратов дает возможность получить уравнение усталостной кривой с вероятностью неразрушения P_H = 50 % в виде

$$\sigma = \sigma_0 + a\cdot\lg N. \quad (6)$$

При этом предполагается, что если все значения σ и N измерены с одинаковой точностью, то σ_0 и a определяются из условия, что сумма квадратов отклонений измеренных значений, от вычисленных по формуле (6), будет минимальной. Определенные на основании этого условия коэффициенты имеют вид:

$$a = \frac{\sum_1^n\left(\lg N_i\cdot\sigma_{\max i}\right) - \overline{\lg N_i}\cdot\sum_1^n\sigma_{\max i}}{\sum_1^n\left(\lg N_i\right)^2 - \overline{\lg N_i}\cdot\sum_1^n\lg N_i}; \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \left[\frac{1}{n}\cdot\left(\sum_1^n \sigma_{\max i}\right)\cdot\left[\sum_1^n\left(\lg N_i\right)^2\right] - \right.$$
$$\left. -\frac{1}{n}\cdot\left(\sum_1^n\lg N_i\right)\cdot\left(\sum_1^n\lg N_i\cdot\sigma_{\max i}\right)\right] /$$
$$/\left[\sum_1^n\left(\lg N_i\right)^2 - \overline{\lg N_i}\cdot\sum_1^n\lg N_i\right]. \quad (8)$$

Показатель наклона усталостной кривой при вероятности неразрушения P_H = 50 % определяется по формуле

$$m_{50} = r\cdot\frac{S_N}{S_\sigma}. \quad (9)$$

После обработки результатов испытаний уравнения семейства кривых при различной вероятности неразрушения запишутся в виде

$$\text{Р}_\text{н} = 50\ \% - \lg N = 8{,}65 - 0{,}408\sigma_{max};$$

$$\text{Р}_\text{н} = 0{,}1\ \% - \lg N = 7{,}38 - 0{,}25\sigma_{max};$$

$$\text{Р}_\text{н} = 99{,}9\ \% - \lg N = 6{,}46 + 0{,}126\sigma_{max}. \quad (10)$$

Кривые, соответствующие уравнениям (10), приведены на рис. 3, согласно которым предел выносливости паяных образцов, полученных с применением «базовой технологии», составил 9 МПа.

По методике ускоренных испытаний (методу Локати) определяли циклическую прочность трех паяных образцов из меди М1, полученных с применением разработанного нами нового состава флюса: канифоль – 30 %, кубовый остаток производства ДМТ – 16 %, этиловый спирт – остальное и припоя ПОС 61. Кубовый остаток производства диметилтерефталата является более сильным активатором флюсообразования, чем другие известные добавки (гидразин, анилин соянокислый и др). Активность предложенного и известных составов флюсов определяли по разработанной нами методике определения площади растекания дозированной навески припоя ПОС 61 объемом 64 мм ^{3} по поверхности образцов из меди М3 [4] (табл. 2). Указанная методика оценки активности паяльных флюсов заключается в определении масс увеличенного изображения образца и капли припоя и отличается простотой реализации и высокой точностью результатов (погрешность измерений составляет не более 0,5 мм ^{2}, что соответствует ГОСТ 20485–75 *Пайка. Методы заполнения зазора припоем*).

Метод Локати обеспечивает достаточно высокую точность при определении пределов выносливости при небольшом объеме испытаний [4]. Он основан на гипотезе линейного суммирования относительных долговечностей Пальмгрена-Майнера, согласно которой разрушение образца наступает, если сумма относительных долговечностей, получаемых образцом или деталью на

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

различных ступенях нагружения, достигает определенной величины a, т. е.

$$\sum (n_i / N_i) = a. \qquad (11)$$

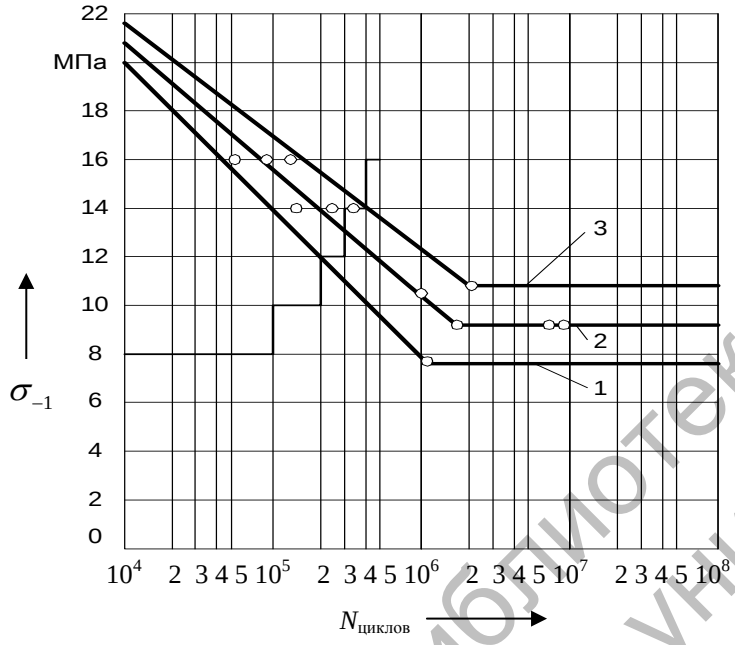

Рис. 3. Семейство кривых для определения предела выносливости при разной вероятности неразрушения: 1 – $P_н$ = 99,9 %; 2 – $P_н$ = 50 %; 3 – $P_н$ = 0,1 %

Табл. 2. Площадь растекания припоя ПОС 61 по образцам из меди М1

Номер состава	Компонент	Содержание компонентов, вес. %	Площадь растекания припоя, мм^2
1 (предложенный состав)	Канифоль Кубовый остаток производства ДМТ Этиловый спирт	30 16 Остальное	436
2 (известный состав)	Канифоль Этиловый спирт	30 Остальное	255
3 (известный состав)	Канифоль Гидразин Этиловый спирт	30 5 Остальное	328

Для ускоренной оценки пределов выносливости испытывают при ступенчатом увеличении нагрузки не менее трех образцов и определяют суммы относительных долговечностей для семейства кривых усталости, соответствующих различным вероятностям неразрушения: 95; 50 и 5 %. По трем значениям сумм относительных долговечностей a_1, a_2 и a_3 и соответствующим значениям σ_1, σ_2, σ_3 строятся графики в координатах $a - \sigma_R$, из которых методом графической интерполяции определяется значение предела выносливости σ_R, соответствующее $a_э$ = 1. Найденные таким образом значения σ для партии образцов усредняются, определяя при этом среднее значение предела выносливости.

В процессе нагружения должна выдерживаться постоянной скорость ступенчатого роста напряжений:

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

$$\alpha = \frac{\Delta\sigma}{n_i}, \qquad (12)$$

где $\Delta\sigma$ – перепад по напряжению между двумя соседними ступенями нагружения; n_i – число циклов на каждой ступени нагружения.

Скорость роста напряжений существенным образом сказывается на результатах испытаний. По рекомендации [3] α принимают равной $20 \cdot 10^{-5}$ МПа/цикл. Однако для соединений с высоким уровнем концентрации напряжений ее рекомендуют уменьшать. Так как образцы для определения циклической прочности паяных соединений имеют высокий уровень концентрации напряжений по границам соединения, скорость нагружения была принята равной $1 \cdot 10^{-5}$ МПа/цикл.

На рис. 4 представлены интерполяционные кривые для определения предела выносливости исследуемых образцов по методу Локати, который составил 10,5 МПа.

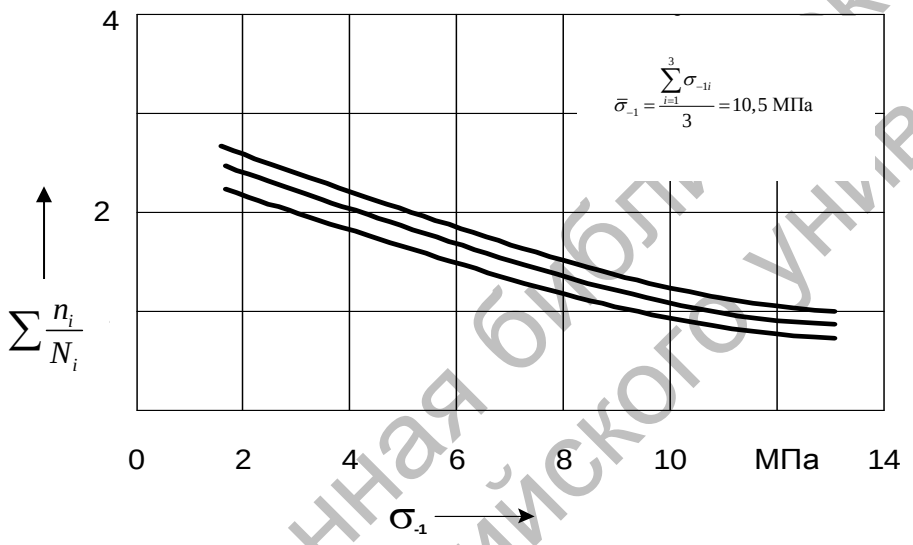

Рис. 4. Интерполяционные кривые для определения предела выносливости паяных соединений

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что при увеличении активности флюса для низкотемпературной пайки меди предел выносливости паяных соединений увеличился с 9 до 10,5 МПа.

Выводы

1. Активность флюсов для низкотемпературной пайки является одним из важных факторов, влияющих на циклическую прочность паяных соединений.

2. При увеличении активности флюса для низкотемпературной пайки меди, что определяется увеличением площади растекания припоя в 1,7 раза, предел выносливости паяного соединения увеличивается не менее чем на 10…15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Школьник, Л. М.** Методика усталостных испытаний : справочник / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 301 с. : ил.

2. **Десятник, В. В.** Разработка способа магнитно-импульсной обработки соединений, выполняемых контактной точечной сваркой, для повышения их усталостной прочности : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 : защищена 10.05.80 : утв. 20.01.81 / Десятник Валерий Владимирович. – Могилев, 1985. – 211 с. – Библиогр. : с. 200–208.

3. **Тарасенко, И. В.** Повышение работоспособности паяных соединений регулированием поля остаточных напряжений и применением новых технологических материалов : дис. …

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

канд. техн. наук : 05.03.06 : защищена 05.12.03 : утв. 05.03.04 / Тарасенко Ирина Владимировна. – Могилев, 2003. – 139 с. – Библиогр. : с. 110–120.

4. **Данилко, Б. М.** Ускоренное определение предела выносливости сварных соединений / Б. М. Данилко, В. И. Дьяченко, Л. Н. Ларина // Автоматическая сварка. – 1972. – № 2. – С. 22.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 04.06.2008

I. V. Tarasenko, V. V. Desyatnik

Research of influence of soldering flux activity for low temperature copper soldering on cyclic strength of soldered joints

Questions connected with cyclic strength of low temperature soldered joints are considered in the article. It has been shown on the example of new flux composition for low temperature copper soldering that flux activity increasing which is determined by ПОС61 soldering spreading area on M1 samples ensures 10…15 % increasing of soldered joint cyclic strength.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета