4. *Витенберг Ю. Р.* Оценка волнистости поверхности с помощью корреляционных функций // Там же. - 1971. - № 8. - С. 58-60.
5. *Murari G., Vullo V., Stroppiana B.* Analisi sperimentale degli errori micro e macrogeometrici di superfici lavorate //Technica Italiana. - 1979. - № 6. - S. 349-355.
6. *Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). - М.: Наука, 1975. - 344 с.
7. Выбор диагностических признаков технического состояния станков на основе макро- и микрогеометрических характеристик обработанной поверхности / В. А. Авакян, К. С. Бабаян и др. // Динамика станочных систем гибких автоматизированных производств: Тез. докл. 3-й Всесоюз. н.-т. конф. - Тольятти. 1988. - С. 217-218.
8. *Авакян В.А., Бабаян К.С., Мкртчян В.С.* Диагностика технического состояния токарных станков на основе спектрального анализа макро- и микрогеометрических характеристик обработанной поверхности // Методы и средства виброакустической диагностики машин: Тез. докл. Всесоюз. н.-пр. конф. - Ивано-Франковск. 1988. - С. 106-107.
9. *Стейн С., Джонс Дж.* Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. - М.: Связь. 1971. - 376 с.

НПО "Армстанок"

24. IV. 1993

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН). т. XLIX. №2. 1995. с. 79-84.

УДК 621.382.2

МАШИНОСТРОЕНИЕ

С.А. ГАСПАРЯН

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ НАГРУЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել տարասեռ նյութերի զոդամիացությունների երկարակեցությունը՝ փոքր թվով ցիկլերի և ջեռուցման դեպքում փոփոխական բեռնավորման պայմաններում: Տրված է տարբեր ձևով կատարված զոդակարերի փորձարկման արդյունքների համեմատական վերլուծությունը: Գնահատված է փոփոխական բեռնվածքի դեպքում մնացորդային լարումների կուտակումը:

Цель работы - исследование долговечности паяного соединения разнородных материалов в условиях переменного нагружения с малым числом циклов и нагрева.

Дан сравнительный анализ результатов усталостных испытаний разных форм исполнения паяного шва. Оценено накопление остаточных деформаций при переменном нагружении.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

The aim of this paper is to investigate the durability of soldered joints of heterogeneous materials in terms of alternating load with low number of cycles and heating. A comparative analysis of the results of fatigue tests for the soldered seam having different forms is given. Accumulation of residual deformations at cyclic loading is evaluated.

Ill. 4. Table 1. Ref. 4.

Особенности поведения паяных конструкций в области ограниченной выносливости, в частности, в случаях, когда они работают в условиях переменного нагрева, изучены недостаточно.

При оценке влияния частоты нагружения на долговечность паяных конструкций в вышеизложенных условиях отсутствуют однозначные решения [1, 2].

Цель исследования - оценить влияние угла скоса в месте пайки встык паяного соединения "сталь-вольфрам" с серебряным припоем на долговечность пайки в условиях переменного нагружения с малым числом циклов ($10^1 - 5\ 10^4$) и нагрева. Угол наклона, при котором имеет место наиболее благоприятное напряженное состояние в стыке шва, теоретически получен равным 67° [3].

Для оценки результатов испытаний в вероятностном аспекте одна серия испытаний была принята за базовую, статистические параметры оценки долговечности которой были приняты за основу для других серий испытаний образцов, что позволило при малом количестве образцов получить необходимую для исследования информацию. Выбор режима нагружения образцов, при котором они испытывались, обоснован на следующих предпосылках. Корпуса полупроводниковых приборов работают в условиях вибрации и циклического нагрева, в их сечениях возникают переменные растягивающие напряжения, характер изменения которых можно аппроксимировать отнулевым циклом растяжения. Если учесть при этом повторяющуюся ударную нагрузку, напряжения от которой не подчиняются синусоидальному закону, то при суммарной работе всех напряжений характер их изменения целесообразно воспроизводить прямоугольной формой цикла.

Ресурс долговечности полупроводниковых приборов в реальных условиях работы по представленной информации составляет примерно 10^4 термоциклов в диапазоне температур $t = (100 - 150)^\circ C$. Поэтому область испытаний образцов ограничена в пределах малоцикловой усталости. Образцы, использованные для испытаний, имитируют корпуса полупроводниковых приборов, т.е. представляют собой паяное соединение "сталь-вольфрам" посредством припоя *ПСр*40.

Образцы изготовлены в виде стержней с прямоугольным сечением, размеры которых выбраны, исходя из общих требований, предусмотренных ГОСТ 2860-65, при этом толщина в корпусе прибора соответствует толщине пластины из вольфрама. Это позволяет исключить масштабный эффект, т.е. считать испытание образцов натурным. Паяное соединение образцов выполнено встык под прямым углом 67°. При этом теоретически считается, что напряженное состояние для исследуемого контакта "сталь-вольфрам" вблизи зоны концентрации напряжений является наиболее оптимальным. Изготовление образцов производилось согласно [3].

Проводились три серии опытов для сравнительной оценки влияния изменения угла паяного шва на долговечность при комнатной и повышенной температурах. Ввиду того, что количество образцов ограничено, программой испытаний предусмотрено построить одну базовую усталостную кривую, а для остальных случаев определить лишь относительное смещение кривых, считая параметры распределения известными. Для измерения деформаций образцов в зоне пайки было изготовлено сменное приспособление [3].

Часть испытаний при комнатной температуре была проведена на усталостной машине "Инстрон-3710-016", а другая часть при нагреве образцов в пределах (100-150)°C была реализована для исследований образцов на усталость при повышенных температурах. Нагрев образца производился непосредственным пропусканием электрического тока.

При этом продольные и поперечные деформации образца во время эксперимента непосредственно изменялись с помощью бесконтактных датчиков (деформаторов, которые посредством электрических сигналов непрерывно регистрируют на двухкоординатных приборах деформации в цикле и их изменение с числом нагружений). Испытания образцов на этих машинах были проведены в идентичных условиях, используя при этом возможности "Инстрон". Образцы испытывались при частотах 0,2, 20 и 100 *Гц* для оценки влияния частоты нагружения на долговечность образца.

Перед началом испытаний предварительно назначались уровни нагрузок с установленной последовательностью нисходящих величин нагрузок. Величины уровней напряжения устанавливались соответственно программе исследования путем предварительных испытаний. На каждом уровне напряжения для построения базовой кривой усталости испытывались по пять образцов. Результаты испытаний подвергались статистической обработке, которая произведена функцией преобразования вероятностей $\arcsin\sqrt{P}$, при этом расчет сводится к простому регрессионному расчету в виде оценочной функции $\bar{y} = a + bx$ [4].

Оценка области ограниченной выносливости осуществляется в два этапа. На первом этапе определяются коэффициенты оценочной функции $f(N)$. Схема оценки непосредственно с рассчитанными величинами результатов испытаний базовой кривой для образцов с углом скоса 67° приведена в таблице.

Таблица

Схема оценки испытаний образцов, паяных под углом 67°

i	P	Z_i	Уровни напряжения					
			σ_1=220 *МПа*		σ_2=180 *МПа*		σ_3=150 *МПа*	
			$N_i(\sigma_1)\times 10^3$	$\lg N_i$	$N_i(\sigma_2)\times 10^3$	$\lg N_i$	$N_i(\sigma_3)\times 10^3$	$\lg N_i$
1	0,2	0,46365	2,22	0,346353	3,16	0,499688	6,15	0,788750
2	0,4	0,68472	2,24	0,350248	3,30	0,518514	8,22	0,914982
3	0,6	0,88608	2,85	0,454844	8,22	0,914872	15,15	1,180412
4	0,8	1,10715	3,06	0,556303	10,15	1,006466	22,55	1,353146
5	0,9	1,24905	5,01	0,707570	12,55	1,098644	36,78	1,565612
Значения Z_i для i=n, P=1-0,5n								
$\sum Z_i$ =4,39065			$Z_i = \arcsin\sqrt{P}$					
$\sum Z_i$ =4,25486			— " —					
$\sum \lg N_i \longrightarrow$			2,4153318		4,038184		5,802917	
$\sum (\lg N_i Z_i) \longrightarrow$			2,3031375		3,883936		5,4920321	

В результате вычислений получены следующие оценочные функции:

1) для образцов, паяных под прямым углом -

$$\lg \hat{N} = 0,0645 + 0,8462 \arcsin\sqrt{P} \quad (\sigma = 180 \ МПа),$$

$$\lg \hat{N} = 0,2890 + 0,9925 \arcsin\sqrt{P} \quad (\sigma = 150 \ МПа),$$

$$\lg \hat{N} = 0,0824 + 0,4562 \arcsin\sqrt{P} \quad (\sigma = 220 \ МПа).$$

2) для образцов, паяных под углом 67°

$$\lg N = 0{,}3019 + 0{,}8123 \arcsin\sqrt{P} \quad (\sigma = 180 \ МПа).$$

На втором этапе производится определение характеристик функциональной зависимости $\sigma - N$ по линейной функции $\lg N = a - b\lg\sigma$.

Уравнения семейства кривых испытаний получаются для соответствующих P:

$$\lg N = 2{,}89 - 1{,}22\lg\sigma \quad (P = 0\%),$$

$$\lg N = 4{,}72 - 1{,}95\lg\sigma \quad (P = 5\%),$$

$$\lg N = 5{,}68 - 2{,}14\lg\sigma \quad (P = 50\%),$$

$$\lg N = 13{,}78 - 5{,}58\lg\sigma \quad (P = 95\%).$$

Семейство кривых, описываемых этими уравнениями, приведено на рис. 1. Там же приведен график кривой по результатам испытаний образцов с прямым скосом, для которого коэффициент b принят тот же.

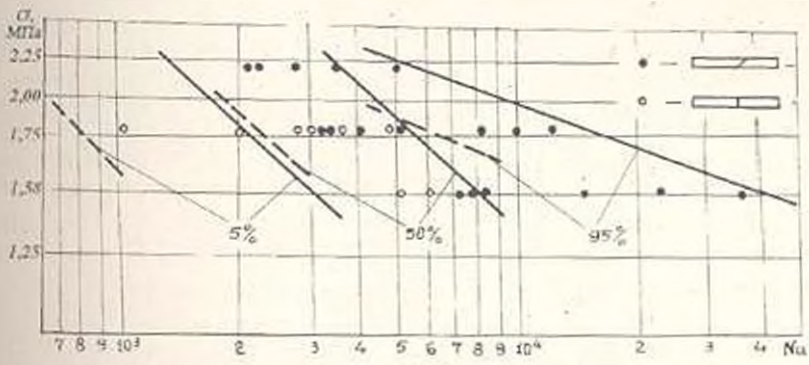

Рис. 1. Оценка результатов испытаний образцов при разных вероятностях разрушения

Сопоставление кривых усталости образцов с прямыми и косыми швами показывает, что, несмотря на значительное рассеяние результатов при всех вероятностях разрушения, долговечность образцов с косыми швами существенно повышается при всех уровнях нагружения. Это, по-видимому, объясняется благоприятным распределением напряжений по всему сечению шва по сравнению со швом, выполненным под прямым углом. Следует, однако, отметить некоторое увеличение рассеяния результатов при испытании образцов с косым швом, что является следствием увеличения размеров шва в поперечном направлении, при котором вероятность увеличения числа дефектов в процессе пайки возрастает.

Интерес представляет оценка влияния частоты нагружения на долговечность образцов. С этой целью результаты испытаний образца с косым швом были сгруппированы по режимам нагружения при высоких и низких частотах и статистически обработаны при вероятности разрушения $P = 50\%$

$$\lg N = 7{,}93 - 3{,}1\lg\sigma \quad \text{при} \quad \nu = (0{,}2\cdots5) \ Гц.$$

$$\lg N = 6{,}59 - 2{,}6\lg\sigma \quad \text{при} \quad \nu = (80\cdots100) \ Гц.$$

На рис. 2 приведены соответственно кривые усталости в области малых чисел циклов изменения напряжений.

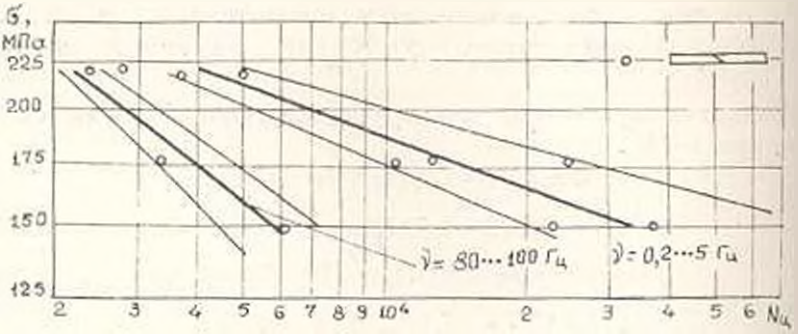

Рис. 2. Кривые усталости образцов, испытанных при разных частотах нагружения

Анализ кривых показывает значительное влияние частоты нагружения на долговечность образцов. Взаимное расположение кривых выносливости свидетельствует о том, что после некоторых значений перенапряжении увеличение последних влечет за собой увеличение относительной долговечности по мере нарастания частоты нагружения.

С целью оценки влияния нагрева на выносливость испытывались образцы двух указанных видов исполнения паяного шва на трех уровнях напряжений. Испытания не выявили существенного различия результатов при разных исполнениях паяного шва в области малых циклов нагружения. Результаты испытании при вероятности разрушения $P = 50\%$ с $\lg N = 4.48 - 1.78 \lg \sigma$ приведены на рис. 3. Там же для сопоставления приведена кривая усталости образцов со скосом при вероятности разрушения $P = 50\%$, взятая из графика на рис. 1.

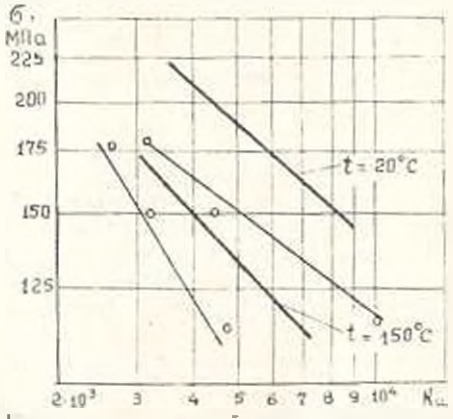

Рис. 3. Кривые усталости образцов, испытанных при разных температурах

Сделана попытка оценить изменение остаточных деформаций в процессе циклического нагружения образцов паяных соединений, результаты испытаний которых отражены на рис. 4. В процессе испытаний непрерывно изменялась разность ширины петли гистерезиса за каждый полуцикл, определяемая в виде накопленной за цикл односторонней остаточной деформации $\bar{\varepsilon}_c$. Испытания проводились при

частоте нагружения $\nu = 0.2$ *Гц* на уровне напряжений $\sigma = 180$ *МПа* при нормальных условиях и температуре $t = 180^{\circ}C$.

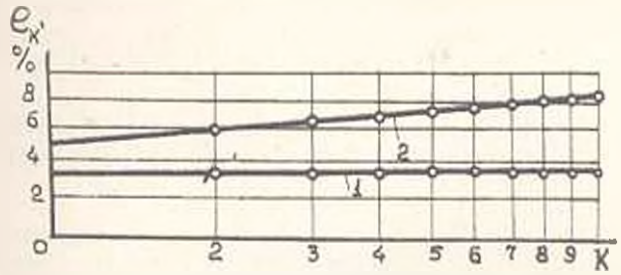

Рис. 4. Накопление остаточных деформаций в зависимости от числа циклов нагружений:

1) при $t = 20^{\circ}$, 2) при $t = 180^{\circ}$.

Из графика на рис. 4 видно, что при нормальных условиях нагружения паяное соединение является циклически стабилизирующим материалом, но при повышенных температурах изменяет свое поведение в сторону циклического разрушения. Кинетика изменения деформаций с числом циклов указывает на то, что циклические свойства материала при нагружении в нормальных температурных условиях определяют усталостный характер разрушения, а при повышенных температурах — — квазистатический.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лашко Н.Ф., Лашко С. В.* Пайка металлов. - М.: Машиностроение, 1977. - 323 с.
2. *Минчики Масаюки* и др. Оценка термоусталостной прочности нахлесточных паяных соединений // Дзайре: J. Soc. Mater. Sci, Jap. - 1981. - N 331. - P. 330-335.
3. Исследования статической и динамической прочности корпусов полупроводниковых приборов на основе сталь-вольфрам-серебро-медь: Отчет о НИР / Ереванский полит. и-т (ЕрПИ); Руководитель С.Х. Геворкян. - № ГР 01828067877. - Ереван, 1983. - 91 с. - Отв. исполн. С.А. Гаспарян.
4. Поведение стали при циклических нагрузках /Под ред. В. Даля. - М.: Металлургия, 1983. - 568 с.

ГИУА 16.V.1994