

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Беларуско-российский университет, г. Могилев, пр. Мира, 43

**Введение.** Пайка широко применяется в различных областях современной промышленности. Для некоторых конструкционных материалов, например, меди и ее сплавов она является практически единственным методом получения неразъемных соединений. В процессе эксплуатации паяные соединения часто подвергаются воздействию переменных нагрузок, поэтому циклическая прочность является одной из важнейших характеристик их работоспособности. При этом правильный выбор конструкции образца является основой для обеспечения достоверности результатов при проведении испытаний паяных соединений методом изгиба с вращением [1]. В работе [1] показано, что стандартный образец [2] обеспечивает низкую достоверность результатов. Здесь же приведены рекомендации по конструированию, которые позволяют с большей достоверностью определять количество циклов нагружения при проведении испытаний. Однако эти конструкции, рекомендуемые авторами работы [1], требуют значительного расхода дорогостоящего паяемого материала, что увеличивает стоимость испытаний.

**Постановка задачи.** В данной работе поставлена задача снижения затрат на изготовление образцов для испытания паяных соединений при одновременном обеспечении высокой достоверности получаемых результатов.

Для этого нами была разработана конструкция образца, в которой из дорогого паяемого материала (например, меди) выполнены только небольшая вставка 5 и стержень 4 (рис. 1). Остальные элементы образца выполнены из стали. Сравнение показывает, что предлагаемая конструкция позволяет сократить расход цветных металлов не менее, чем на 75%. Кроме того, в предлагаемой нами конструкции обшая ось стержня 4 и вставки 5 может смещаться от

носительно оси закрепляющих пластин 1 и 2 на величину  $e$ , что позволяет проводить испытания в условиях воздействия на испытываемый паяный шов 6 не только изгибающего, но и крутящего момента. При вращении такого образца крутящий момент изменяется в соответствии с формулой:

$$M_{кр} = P e \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $P$  – вес груза, подвешенного к нагружающему устройству;  $e$  – смещение оси стержня относительно оси пластин;  $\varphi$  – угол поворота образца, обусловленный его вращением в процессе испытания.

Напряжения среза от крутящего момента достигают максимума на краю паяного шва (там же максимальны и нормальные напряжения). Они также изменяются по схеме симметричного цикла, т. к. в процессе вращении крутящий момент изменяет не только свою величину, но и направление.

Тогда величину касательных напряжений в крайних волокнах испытываемого паяного шва можно определить из выражения:

$$\tau = \frac{M_{кр} R}{J_n} = \frac{M_{кр}}{W_n}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус стержня;  $J_n$  – полярный момент инерции сечения стержня;  $W_n$  – полярный момент сопротивления сечения диска.

Полярный момент сопротивления паяного шва определяется по известной формуле [3]:

$$W_n = \frac{\pi D^3}{16}, \quad (3)$$

где  $D = 2R$  – диаметр стержня.

С учетом результатов (2) и (3) максимальные касательные напряжения цикла (при  $\varphi = 0$ ) определяются следующим образом:

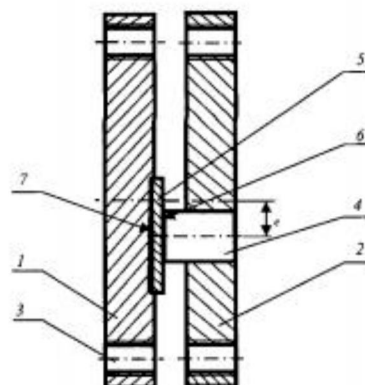


Рис. 1. Конструкция образца для испытаний на циклическую прочность, снабженного вставкой из испытываемого материала. 1, 2 – диски; 3 – крепежные отверстия; 4 – стержень из паяемого материала; 5 – вставка из паяемого материала; 6 – испытываемый паяный шов; 7 – прикрепляющий паяный шов

$$\tau_{max} = \frac{16 P e}{\pi D^3} \quad (4)$$

Различие в материалах, из которых изготавливаются пластина 1 и вставка 5, приводит к образованию остаточных термических напряжений во всей зоне рассматриваемого образца, прилегающей к прикрепляющему паяному шву 7. Если в эту зону попадет испытываемый паяный шов 6, то термические напряжения могут оказать значительное влияние на результаты проводимых испытаний, искажая их. Поэтому исследование поля остаточных напряжений, обусловленных различием в коэффициентах термического расширения материалов пластины 1 и вставки 5, соединяемых паяным швом 7, для рассматриваемых образцов является важной задачей, без решения которой невозможно их правильное конструирование.

В данной работе исследование полей остаточных термических напряжений проведено расчетным методом. Для этого был использован метод конечных элементов, реализованный посредством программного продукта «COSMOS M». Схема разбиения образца на конечные элементы приведена на рис. 2. Материал пластин 1 и 2 – сталь толщиной 10 мм, материал стержня 4 и вставки 5 – медь М1. Температура плавления припоя – 337 °С. Эти условия

характерны для проведения испытаний соединений медь-медь, паянных легкоплавким припоем. При проведении расчетов анализировали распределение радиальных ( $\sigma_x$ ), осевых ( $\sigma_y$ ) и окружных ( $\sigma_z$ ) составляющих остаточных напряжений.

Наиболее важным для практического использования результатом проведенных расчетов является то, что было установлено значительное влияние, которое оказывает толщина вставки 5 не только на величину напряжений, но и на характер их распределения. При толщинах 0,5–1,0 мм и в материале пластины, и в материале вставки область термических напряжений охватывает район, радиус которого превышает радиус стержня 4 и выходит за границы испытываемого паяного шва (рис. 3). При толщинах 2–3 мм термические напряжения локализируются в области, прилегающей к паяному шву 7 и не достигают испытываемого паяного шва 6. Поэтому у краев испытываемого паяного шва, где нормальные и касательные переменные напряжения достигают максимума, термические напряжения практически отсутствуют. В соответствии с результатами, приведенными на рис. 3, здесь имеют место сжимающие напряжения  $\sigma_x$  величиной около 3,5 МПа, которые не могут оказать заметного влияния на стойкость при циклическом нагружении. Это позволяет избежать искажения результатов испытаний однородных паяных соединений, обусловленных воздействием поля остаточных термических напряжений, и с успехом применять образцы данного типа в практике. Для того, чтобы еще больше снизить степень воздействия припаяваемой стальной пластины 1 на результаты испытаний паяного соединения медь-медь можно рекомендовать использо-

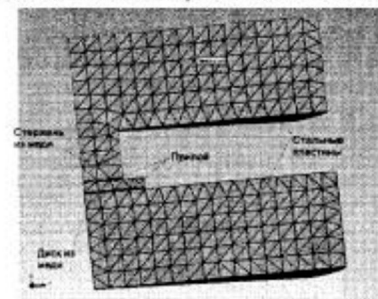


Рис. 2. Схема разбиения модели на конечные элементы

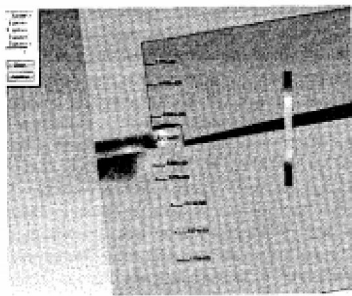


Рис. 3. Распределение радиальных напряжений при толщине вставки, равной 1,0 мм

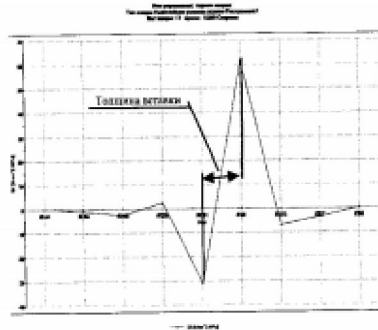


Рис. 4. Влияние расположения точки на величину радиальной составляющей остаточных термических напряжений при толщине вставки 1 мм

вание для пайки прикрепляющего паяного шва 7 припой, более легкоплавкий, чем испытываемый. В качестве такого припоя можно использовать, например, сплав Розе, который имеет температуру плавления всего 94 °С [4]. Применение такого припоя сокращает температурный интервал образования термических напряжений с соответствующим снижением их уровня. При этом требуемая прочность прикрепления вставки может быть легко обеспечена увеличением ее радиуса. Как показывает формула (4), при диаметре вставки 3, который превышает диаметр стержня 4 в 1,7 раза, напряжения от приложенной нагрузки в паяном шве 7 будут в 5 раз меньше напряжений в испытываемом паяном шве 6.

При проведении исследований работоспособности паяных соединений значительный интерес представляют результаты, отражающие влияние, которое оказывают остаточные напряжения на циклическую прочность паяных соединений. Поэтому в исследовательских целях приходится специально создавать поле остаточных напряжений в паяных соединениях одинаковых материалов перед началом испытаний. Для этих целей были разработаны способы воздействия на напряженное состояние, основанные на применении временных вспомогательных элементов, припаяваемых к испытываемому паяному соединению, припоем с температурой плавления, большей, чем у испытываемого шва [5, 6]. Они позволяют создавать в зоне испытываемого паяного шва остаточные напряжения величиной до 60 МПа, однако требуют значительных затрат, что обусловлено необходимостью пайки дополнительного паяного шва и последующей меха-

нической обработки для удаления временного вспомогательного элемента после выполнения испытываемого паяного шва. Еще одним недостатком известного способа является значительное термическое воздействие на детали испытываемого паяного соединения при пайке временного вспомогательного элемента из-за высокой температуры плавления припоя, применяемого для этой цели. Последняя особенность самым непосредственным образом влияет на достоверность результатов испытания и при значительной разнице в температурах плавления припоев, используемых для пайки основного и вспомогательного швов, может серьезно исказить эти результаты.

По нашему мнению, рассматриваемая конструкция образца больше подходит для исследования влияния остаточных напряжений на циклическую прочность. Как следует из рис. 4, простое использование медной вставки толщиной 1 мм, припаяваемой к стальной закрепляющей пластине, обеспечивает создание напряженного состояния, при котором величина радиальной составляющей в паяемом материале на границе паяного шва составляет более 60 МПа. Чтобы оценить уровень термических напряжений в паяном соединении медь-медь в различных вариантах выполнения образца рассматриваемой конструкции были проведены расчеты напряженного состояния для различных толщин вставки и температур плавления припоев, используемых при ее припаявании к пластине. Результаты расчетов сведены в таблицу.

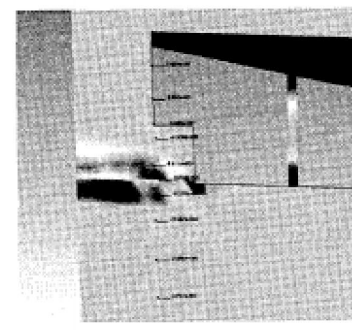


Рис. 5. Распределение радиальных напряжений при толщине вставки, равной 3 мм

Влияние толщины вставки и температуры плавления припоя на величину радиальной составляющей остаточных термических напряжений

№ в. п.	Толщина вставки, мм	Температура плавления припоя, °С	Величина радиальной составляющей на границе испытываемого паяного шва, МПа
1	1,0	337	61,2
2	3,0	337	3,5
3	1,0	600	103,7
4	3,0	600	6,2
5	1,0	94	22,7
6	3,0	94	1,28

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, следует отметить важную особенность образца рассматриваемой конструкции. А именно: пригодность для проведения испытаний соединений, паяных как легкоплавким, так и тугоплавким припоями. Ведь припой с высокой температурой плавления имеют и высокую прочность. Поэтому при проведении испытаний в условиях воздействия остаточных напряжений они требуют более высокого уровня этих напряжений. Эти требования хорошо выполняются в предлагаемом образце. При повышении температуры плавления припоя до 600 °С радиальные напряжения в образце

увеличились с 61 МПа до 104 МПа. В известном же способе проведения испытаний остаточные напряжения создаются за счет разницы в температурах плавления припоев (испытываемого и вспомогательного, который должен быть более тугоплавким, чем испытываемый). С увеличением температуры плавления испытываемого припоя эта разница будет только уменьшаться. Поэтому в известном способе наведения остаточных напряжений их уровень не может повышаться с ростом температуры плавления испытываемого припоя. Это является еще одним недостатком известного способа, от которого можно избавиться путем применения образцов, имеющих вставку из паяемого материала.

Очевидно, что напряженное состояние в предлагаемом образце можно регулировать, варьируя величину коэффициента термического расширения материала вставки. С увеличением разницы в коэффициентах термического расширения материалов пластины 1 и вставки 5 уровень остаточных термических напряжений и размеры зоны их действия будут увеличиваться.

## Выводы

1. Предложена конструкция образца для проведения испытаний паяных соединений на циклическую прочность методом изгиба с вращением, которая обеспечивает снижение расхода дорогих паяемых материалов за счет применения вставок, также изготавливаемых из паяемого материала.

2. Установлено, что использование вставок из паяемого материала позволяет регулировать напряженное состояние в зоне испытываемого паяного шва за счет изменения толщины вставки, температуры плавления припоя, используемого для прикрепления вставки и разницы в коэффициентах термического расширения материалов закрепляющей пластины и вставки.

## Литература

1. Цумарев Ю.А., Тарасенко И.В. Образцы для определения циклической прочности паяных соединений методом изгиба с вращением // Сварочное производство, 2004, № 2. – С. 17–18.
2. ГОСТ 26446–85 Соединения паяные. Методы испытаний на усталость. – Введ. 22.01.85 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 23 с.
3. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 512 с.
4. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
5. А. с. 1523950. МКН G01N 1/28, B23K 1/00. Способ подготовки образца нахлесточного паяного соединения к испытанию / Цумарев Ю. А., Стеклов О. И., Тарасенко И. В., Черикова Е. В. (СССР). – № 4372471/31–27; Заявл. 01.02.88, Опубл. 23.11.89, Бюл. № 43 // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 43. – С. 72.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серія В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і прыборабудавання, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, со держащие новые научные результаты в области машиностроения и приборостроения, материало- ведения и металлургии, химической техники и технологии.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and instrument-making, material authority and metallurgy, applied chemistry

Адрес редакцыі:

Полоцкі дзяржаўны ўніверсітэт, ул. Блокіна, 19, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отг. за выпуск В. П. Іванов, Н. Н. Попок, М. Л. Хейфец

Рэдактары: Р. Н. Аляксеев, Д. М. Маковіч. Тэхн. рэдактар Р. Н. Аляксеев

Падпісанне і печатка 25.02.09. Буцага афарэтная 70 г/м<sup>2</sup>. Формат 60x84<sup>1/2</sup>. Гарнітура Times New Roman  
Рэпраграфія. Усп. печ. а. 18,01. Уч.-зд. а. 22,42 Тираж 60 экз. Заказ 317

УДК 621.791.3

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ  
ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск);  
канд. техн. наук, доц. Ю.А. ЦУМАРЕВ, Т.С. ЛАТУН  
(Белорусско-Российский университет, Москва)

Рассмотрена проблема неопределенности, возникающей при оценке результатов механических испытаний, обусловленная популярным использованием паяных швов. Предложена методика, которая основана на статистической оценке среднего значения показателя прочности одного из испытываемых паяных швов. Это значение должно соответствовать максимальному совпадению второй исходной выборки и статистическим параметрам прочности, полученной путем оценки для всех паяных швов. Проведена экспериментальная проверка предложенной методики, которая показала возможность практического ее применения. Предложена методика статистической оценки показателя прочности паяных соединений можно рекомендовать для более достоверного и корректного сравнения результатов, полученных при испытании образцов различных типов.

**Введение.** Пайка является одним из важнейших технологических процессов современного промышленного комплекса. Она широко применяется для соединения цветных металлов и сплавов, разнородных материалов, а также элементов, имеющих разную толщину. В практике пайки находят применение разнообразные типы соединений, которые имеют различные характеристики несущей способности даже при совершенно одинаковых технологических изготовления. В связи с этим достаточно актуальной проблемой является обоснование сопоставления данных по прочности, относящихся к разным типам паяных соединений. Например, для соединения труб могут использоваться паяные соединения двух типов [1, 2] (рис. 1).

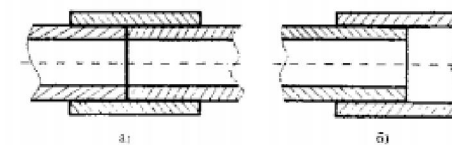


Рис. 1 Типы паяных соединений труб  
а – дуговое; б – телескопичекие

Особенностью конструкции, представленной на рисунке 1 а, является наличие двух паяных швов, работающих параллельно. Здесь рабочая нагрузка не распределяется между двумя швами, а воспринимается полностью каждым швом. Аналогичным образом работают под нагрузкой паяные соединения пластин, снабженные накладками (рис. 2).



Рис. 2 Паяные соединения пластин  
а – с накладкой; б – накладочное

Паяные соединения с двумя швами используются также в конструкции стандартного образца для проведения испытаний на прочность при циклическом нагружении, которые осуществляются методом изгиба с вращением [3]. При этом криволинейный образец с двумя испытываемыми паяными швами находят применение образцы с одним паяным швом, конструкция которых показана на рисунке 3.

Наличие двух одновременно и одинаково нагружаемых паяных швов приводит к неопределенности в оценке их прочностных характеристик, обусловленной тем, что до разрушения доводится только один из испытываемых швов. Поэтому информация о прочностных характеристиках более прочного шва не учитывается, искажая тем самым полученные результаты. В работе [4] показано, что при проведении

испытаний на статическое растяжение оценка предела прочности при срезе может быть занижена на 8 %. В этой же работе установлено, что при испытаниях на выносливость регистрируется количество циклов, которое на 14 % меньше, чем полученное по образцам с одним паяным швом [4].

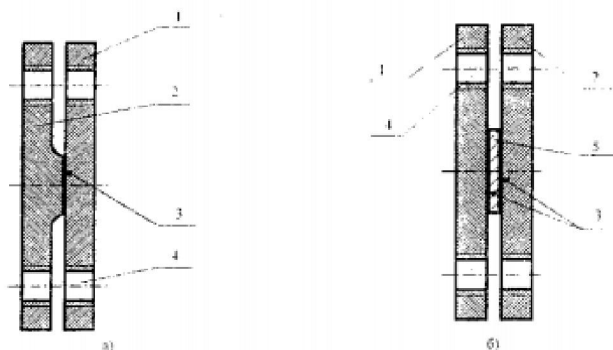


Рис. 3. Конструкция образцов для испытания паяных соединений с одним швом (а) и двумя швами (б) по выносливостной прочности методом кривоизгиба с вращением; 1, 2 – пластины; 3 – паяные швы; 4 – круглые отверстия; 5 – диск

Устранение такой неопределенности, возникающей при попарном нагружении паяных швов, в работе [4] предложено производить путем изменений, вносимых в конструкцию образца для проведения испытаний на выносливость. Эти изменения сводятся к тому, что устраняется второй паяный шов (см. рис. 3) или изменяются его размеры и соответственно несущая способность [5 – 7].

Для испытаний на статическое растяжение (наиболее распространенных при определении работоспособности) рекомендации отсутствуют. Это приводит к тому, что при разработке технологических процессов пайки и конструировании паяных соединений разработчики сталкиваются с несоответствием результатов, полученных при растяжении стандартных образцов с одним паяным швом, и данными по испытаниям реальных конструкций, например, муфтовых соединений труб. Оптимистические ожидания, основанные на результатах испытаний стандартных образцов, не подтверждаются данными, получаемыми при проверочных испытаниях. Это увеличивает сроки разработки конструкторско-технологической документации и внедрения новых конструкций. Кроме того, затрудняется оценка результатов, полученных другими исследователями.

**Цель данной работы** – разработка методики статистической обработки результатов, обеспечивающей получение более согласованных данных при испытании паяных соединений разной конструкции.

**Основная часть.** Рассмотрим данные результатов испытания на статическое растяжение 10-ти паяных образцов, приведенные в работе [4]. Определим статистические характеристики этой выборки: среднее значение предела прочности  $\bar{\sigma}_c = 14,9$  МПа; дисперсия  $D = 2,25$ ; среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,5$ ; асимметрия  $As = 0,75$ ; эксцесс  $Ex = 0,0617$ .

Таблица 1

Пределы прочности на срез паяных соединений алюминия 8-меди

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Предел прочности при срезе, Па	15,4	13,8	17,8	13,5	14,2	15,3	16,7	15	14	13

Производим проверку исходного распределения предела прочности на нормальность по критерию асимметрии и эксцесса [8]:

$$\left| \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_c)^3 \right| \leq \frac{6(n-1)}{\sqrt{(n+1)(n+3)}} \quad (1)$$

$$|Ex| \leq 5 \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)(n+3)(n+5)}} \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  – текущее значение предела прочности паяного соединения;  $\bar{\sigma}_c$  – среднее значение предела прочности;  $n = 10$  – объем выборки.

Проверка показала, гипотеза о том, что исходное распределение предела прочности является нормальным, подтверждается.

Соединяя эти образцы попарно, как рекомендовано в работе [4], мы получим серию выборок, каждую из которых можно рассматривать как аналог испытаний образца с попарным нагружением. Из этой серии наибольший интерес для нас представляет выборка, которая связана с максимальным искажением результатов. Очевидно, что в этой выборке должны присутствовать наименьшие значения предела прочности (13; 13,5; 13,8; 14; 14,2). Определим для нее основные характеристики:

- среднее значение  $\bar{\sigma}_{c1} = 13,7$  МПа;
- дисперсия  $D_1 = 0,22$ ;
- среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 0,47$ .

Как и следовало ожидать, попарное нагружение резко уменьшает разброс экспериментальных данных.

Представляет интерес и выборка, которая связана с минимальным искажением результатов. Чтобы получить ее, надо сложить значения предела прочности, наиболее близкие друг другу, и из каждой пары выбрать меньшее. Тогда получим следующую совокупность пределов прочности: 13; 13,8; 14,2; 15,3; 16,7. Для нее также определим основные характеристики:

- среднее значение  $\bar{\sigma}_{c2} = 14,6$  МПа;
- дисперсия  $D_2 = 2,065$ ;
- среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,44$ .

У каждого образца с двумя паяными швами один из них прочнее другого на некоторую величину  $\Delta_c$ . Поэтому соотношение между показателями прочности паяных швов одного и того же образца запишется следующим образом:

$$a_i = b_i + \Delta_c \quad (3)$$

С учетом результата (3) среднее арифметическое значение предела прочности для серии испытаний образцов с двумя паяными швами, учитывающее прочность всех швов, определится следующим образом:

$$\bar{\sigma}_{c3} = \frac{1}{2n} \sum (a_i + b_i) = \frac{1}{2n} \sum (b_i + \Delta_c + b_i) = \frac{2 \sum b_i}{2n} + \frac{\sum \Delta_c}{2n} = \bar{b}_c + \Delta_{c3} \quad (4)$$

где  $\bar{b}_c$  – среднее арифметическое значение предела прочности, вычисленное с учетом только менее прочных паяных швов;  $\Delta_{c3}$  – среднее значение превышения прочности одного из швов в одном и том же образце.

Результат (4) показывает, что для полной оценки среднего значения прочности образцов с двумя швами необходимо определить только один параметр –  $\Delta_{c3}$ . Конкретные значения величины  $\Delta_{c3}$  зависят от этой оценки.

Используя результат (4) можно решить две противоположные друг другу задачи. Одна из них, более простая, сводится к оценке величины  $\bar{b}_c$  на основании результатов испытания стандартных образцов с одним паяным швом. Необходимость в решении такой задачи может возникнуть, например, при анализе литературных данных с целью предварительной оценки возможной прочности соединений муфтового типа, паяных по той же технологии.

Для решения этой задачи достаточно по рассмотренной выше схеме определить минимальную ( $\bar{\sigma}_{c1}$ ) и максимальную ( $\bar{\sigma}_{c2}$ ) оценки этой величины. Наиболее вероятное значение предела прочности паяных соединений муфтового типа определится как среднее арифметическое:

$$\bar{\sigma}_{c4} = \frac{\bar{\sigma}_{c1} + \bar{\sigma}_{c2}}{2} \quad (5)$$

В рассматриваемом нами случае получим  $\bar{\sigma}_{c4} = 14,15$  МПа, что более чем на 5 % отличается от показателя прочности стандартных образцов.

Вторая, обратная, задача заключается в оценке величины  $\bar{\sigma}_{c3}$  по результатам испытания паяных соединений муфтового типа. Здесь надо по данным о несущей способности менее прочных паяных швов (значениям  $b_i$ ) оценить величину  $\bar{\sigma}_{c3}$ .

По нашему мнению, при такой оценке надо исходить из того, что характеристика прочности всех паяных швов является одной и той же случайной величиной с одним и тем же значением дисперсии  $D$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma$ .

Поскольку конкретные значения величины  $\Delta_{\sigma}$  не влияют на оценку показателя прочности  $\sigma_{\text{ср}}$ , можно считать, что  $\Delta_{\sigma} = \Delta_{\sigma_1} = \dots = \Delta_{\sigma_n} = \Delta_{\sigma_0}$ . Используя результат (3), оценим показатели прочности на разрывных при проведении испытаний швов следующим образом:

$$a_i = b_i + \Delta_{\sigma_0} \quad (6)$$

Увеличивая постепенно значения параметра  $\Delta_{\sigma_0}$  и определяя для каждого из них величины  $a$  рассмотрим совокупность чисел  $a_i$  и  $b_i$  как распределение случайной величины  $\xi_{\sigma_0}$ . Для каждого значения  $\Delta_{\sigma_0}$  определяем основные параметры распределения – дисперсию, среднее квадратическое и эксцесс. Результаты расчета сводим в таблицу 2. Рассмотрим выборку, имеющую наибольший разброс данных, которая дает наименьшую оценку  $\sigma_{\text{ср}}$  с дисперсией  $D_2$ .

Таблица 2

Влияние значений  $\Delta_{\sigma_0}$  на параметры распределения случайной величины

$\Delta_{\sigma_0}$ , МПа	Дисперсия, (МПа) <sup>2</sup>	Среднее квадратическое, МПа	Эксцесс
0	2,065	1,44	-0,88
0,1	1,838	1,356	-0,88
0,2	1,85	1,36	-0,86
0,3	1,86	1,364	-0,83
0,4	1,905	1,38	-0,8
0,5	1,92	1,386	-0,756
0,6	1,94	1,393	-0,7
0,7	1,97	1,402	-0,69
0,8	2,01	1,42	-0,65

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что по мере возрастания величины  $\Delta_{\sigma_0}$  дисперсия, среднее квадратическое и абсолютное значение эксцесса постепенно увеличиваются. При некотором значении  $\Delta_{\sigma_0}$  величина дисперсии достигает первоначального уровня  $D_1 = D_2$ . При этом эксцесс не превышает значения, предусмотренного выражением (2). Величину параметра  $\Delta_{\sigma_0}$ , соответствующую тому значению дисперсии, следует принять за наиболее вероятную. Тогда по формуле (4) получим уточненную оценку предела прочности  $\sigma_{\text{ср}, \text{у}} = 15,0$  МПа. Таким образом, погрешность оценки этой величины благодаря предложенной методике статистической обработки уменьшилась с 0,3 до 0,1 МПа, т.е. в 3 раза.

При других вариантах исходной выборки были также получены более точные оценки предела прочности паяных соединений. Погрешность оценки уменьшалась в 1,4... 1,8 раза.

При уменьшении числа параллельных опытов необходимость в уточнении результатов, получаемых в экспериментах с попарным нагружением, возрастает. Чтобы показать это уменьшило число элементов в рассматриваемой выборке до восьми. Получим следующую совокупность чисел: 15,5; 13,8; 17,8; 15,5; 14,2; 16,7; 14; 13. Для нее определим среднее значение предела прочности  $\sigma_{\text{ср}} = 14,81$  МПа, дисперсию  $D = 2,861$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,691$ . При попарном нагружении и максимальной погрешности результаты испытаний образцов с двумя одинаковыми паяными швами запишутся в виде следующей выборки из 4-х элементов: 13; 13,5; 13,8; 14. При обработке этих данных получим  $\sigma_{\text{ср}} = 13,575$  МПа;  $D = 0,589$ ;  $\sigma = 0,768$ . Как видим, погрешность оценки составляет 8,3 %. Для этой выборки также определим уточненное значение предела прочности путем последовательного увеличения значений параметра  $\Delta_{\sigma_0}$ . Результаты расчетов сводим в таблицу 3, которая является аналогом таблицы 2.

При  $\Delta_{\sigma_0} = 1,3$  МПа среднее квадратическое отклонение составляет 0,803 МПа, что всего на 4,6 % превышает этот показатель для исходной выборки. Поэтому для расчета уточненного значения показателя прочности используем  $\Delta_{\sigma_0} = 1,3$  МПа и получим  $\sigma_{\text{ср}, \text{у}} = 14,225$  МПа. Таким образом, погрешность оценки, обусловленная попарным нагружением паяных швов, снизилась с недопустимо большой величины (8,3 %) до вполне приемлемого значения (3,95 %).

Таблица 3

Определение уточненного значения предела прочности при увеличении объема выборки

$\Delta_{\sigma_0}$ , МПа	Дисперсия, (МПа) <sup>2</sup>	Среднее квадратическое, МПа	Эксцесс
0	0,589	0,768	-0,036
0,1	0,362	0,406	1,045
0,5	0,234	0,484	0,212
0,8	0,345	0,587	0,339
1,2	0,571	0,757	-0,963
1,3	0,645	0,803	-1,11

Для окончательного решения вопроса о возможности применения предлагаемой методики статистической оценки результатов механических испытаний нами была проведена экспериментальная проверка, которая заключалась в сравнении результатов испытаний двух партий паяных образцов медь-медь, паяных припоем ПОС 40. Технологические процессы пайки для образцов обеих партий были одинаковыми, а различие между ними заключалось только в количестве одновременно испытываемых паяных швов. Форма и размеры образцов показаны на рисунке 4.

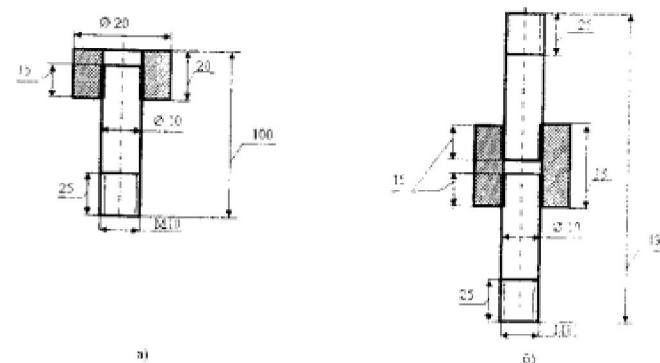


Рис. 4. Конструкция образцов для испытания паяных соединений на статическую прочность при растяжении: а – телескопического; б – муфтового

Механические свойства паяных соединений определяли при растяжении их на машине МР-0,5-1 со скоростью нагружения 18...20 мм/мин.

Образцы первого типа (см. рис. 4, а) имели следующие значения пределов прочности на срез: 42,8; 50,4; 42,06; 39,2; 40,06, среднее значение для которых составляло  $\sigma_{\text{ср}} = 42,904$  Па при дисперсии  $\sigma^2 = 19,68$ .

Для образцов муфтового типа (см. рис. 4, б) были получены другие значения пределов прочности: 42,39; 40,5; 41,72; 37,4; 38,81. При этом среднее значение составляло 40,664 МПа, а дисперсия  $\sigma^2 = 3,9$ .

Приведенные данные показывают, что образцы с двумя одновременно испытываемыми паяными швами действительно обладают меньшей величиной предела прочности при минимуме разброса экспериментальных данных.

Проведем статистическую обработку выводов прочности образцов первого типа и определим теоретическое значение предела прочности при попарном их нагружении. Максимальная оценка этого показателя  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{42,8 + 40,06}{2} = 41,43$  МПа. Минимальная оценка  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{39,2 + 40,06}{2} = 39,63$  МПа.

Тогда наиболее вероятное значение оценки предела прочности в случае попарного нагружения

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = 40,53 \text{ МПа.}$$

Расхождение с результатом эксперимента составил:

$$\delta = \frac{40,53 - 40,064}{40,064} \cdot 100 \% = 1,2 \%$$

Таким образом, предлагаемая методика оценки экспериментальных данных с высокой степенью точности предсказывает результаты для попарного нагружения образцов по данным испытания образцов с одним паяным швом.

Рассмотрим, насколько эффективно предлагаемая методика решает обратную задачу, основанную на результатах для образцов с одним паяным швом по результатам попарного нагружения. Увеличивая постепенно величину  $\Delta_{\text{дп}}$  начиная с нулевого значения и определяя для каждого значения дисперсию, как это предусмотрено предлагаемой методикой, получим данные (табл. 4), аналогичные приведенным в таблице 3.

Таблица 4

Результаты расчета величины  $\Delta_{\text{дп}}$  по результатам эксперимента

$\Delta_{\text{дп}}$ , МПа	Дисперсия, (МПа) <sup>2</sup>	Среднее квадратическое, МПа
0	3,46	1,86
0,2	3,48	1,865
0,4	3,51	1,87
0,8	3,64	1,91
1,2	3,86	1,96
1,5	3,937	1,98

Тогда, приняв  $\Delta_{\text{дп}} = 1,5$ , определяем оценку предела прочности для образцов телескопического типа:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i + \Delta_{\text{дп}})}{2n} = 41,81 \text{ МПа.}$$

Отличие от экспериментального результата составит:

$$\delta = \frac{42,904 - 41,81}{42,904} \cdot 100 \% = 2,55 \%$$

**Выводы.** Предложенную методику статистической оценки показателей прочности паяных соединений можно рекомендовать для более достоверного и корректного сравнения результатов, полученных при испытании образцов различных типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лашко, И.Ф. Пайка металлов / И.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
2. Гржимальский, Л.Л. Технология в оборудовании пайки / Л.Л. Гржимальский, И.И. Ильинский. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
3. Соединения паяные. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 26446-85. – Введ. 22.01.85 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 23 с.
4. Цумарев, Ю.А. Образцы для определения циклической прочности паяных соединений методом «взрыва с вращением» / Ю.А. Цумарев, И.В. Тарасенко // Сварочное производство. – 2004. – № 2. – С. 17–18.
5. Образцы для испытания паяных соединений на циклическую прочность: пат. 6822(С1), (ВУ), МПК G 01. – № 3/32 / Е.Ю. Латылова, Ю.А. Цумарев, И.А. Леванович, И.В. Тарасенко; заявл. 8.08.2000; опубл. 30.03.2005 // Афишайны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2005.
6. Составной образец для определения циклической прочности паяных соединений: пат. Респ. Беларусь. 6996 (С1), (ВУ), МПК G 01 N 3/32 / И.В. Тарасенко, В.П. Березинко, Е.Ю. Латылова, Ю.А. Цумарев; заявл. 1.06.2000; опубл. 30.12.2005 // Афишайны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2005.
7. Паяный образец для испытания на циклическую прочность: патент № 2724 (U), (ВУ), МПК G 01 N 3/32 / Е.Ю. Латылова; заявл. 10.10.2005; опубл. 30.06.2006 // Афишайны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2005.
8. Пустыльник, Е.Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.Н. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

Поступила 28.11.2008