

---

---

УДК 621.791.3

*Ю. А. Цумарев, В. А. Попковский, Е. В. Игнатова*

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПАЯНЫХ КОСОСТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

---

---

UDC 621.791.3

*Y. A. Tsumarev, V. A. Popkovsky, E. V. Ihnatava*

## BEARING CAPACITY OF BRAZED SCARF BUTT JOINTS OF DIFFERENT DESIGNS

---

### **Аннотация**

Проведен сравнительный расчет напряженно-деформированного состояния паяных косостыковых соединений различной конструкции. Предложена конструкция паяного соединения зубчатого типа и проведен его конечно-элементный расчет, который показал высокую несущую способность и незначительную концентрацию рабочих напряжений в соединениях такой конструкции.

### **Ключевые слова:**

несущая способность, распределение рабочих напряжений, паяные косостыковые соединения, паяные соединения зубчатого типа, соединение труб.

### **Abstract**

The comparative calculation of the deformation mode of brazed scarf butt joints of different design is done. The design of a brazed scarf butt joint of toothed type is proposed and its finite element calculation is performed, which shows its high bearing capacity and minor concentration of working stresses in joints of such design.

### **Key words:**

bearing capacity, distribution of working stresses, brazed scarf butt joints, brazed joints of toothed type, pipe junction.

---

В технике создания неразъемных соединений наблюдается расширение объемов применения пайки, в которой используются косостыковые соединения. В источниках литературы отмечается возможность достижения высокой прочности при использовании таких соединений [1, 2]. Например, в [2, с. 87] отмечается, что косые паяные швы обладают высокой прочностью, особенно при угле скоса  $45^{\circ}$ , в [3] – косостыковые паяные соединения обеспечивают равномерное распределение рабочих напряжений не только в паяном шве, но и в основном металле.

В технике известны косостыковые соединения трех типов (рис. 1). Чаще

всего используют соединения, скошенные по толщине соединяемых деталей (см. рис. 1, а). Однако их применение практически полностью исключено при пайке заготовок малой толщины [1]. В [4, 5] при малой толщине соединяемых элементов предлагается использовать соединения, скошенные по ширине пластин (см. рис. 1, б). Были предложены также косостыковые соединения [5], в которых для повышения несущей способности плоскость спая наклонена как к продольной, так и к поперечной оси (см. рис. 1, в).

Из-за определенного разнообразия косостыковых паяных соединений становится актуальным вопрос о том, на-

сколько эквивалентными являются эти конструктивные решения по отношению друг к другу. В работе приведены расчеты конечно-элементных моделей всех разновидностей косостыковых соединений, показанных на рис. 1. Расчеты проведены с использованием пакета SOLID WORKS. Для более удобного

сравнения результаты расчетов сведены в табл. 1...3. Кроме того, полученные результаты представлены в виде распределения рабочих напряжений по плоскостям паяных стыков. Так, на рис. 2 приведены картины распределения рабочих напряжений по паяному шву соединения, скошенного по ширине.

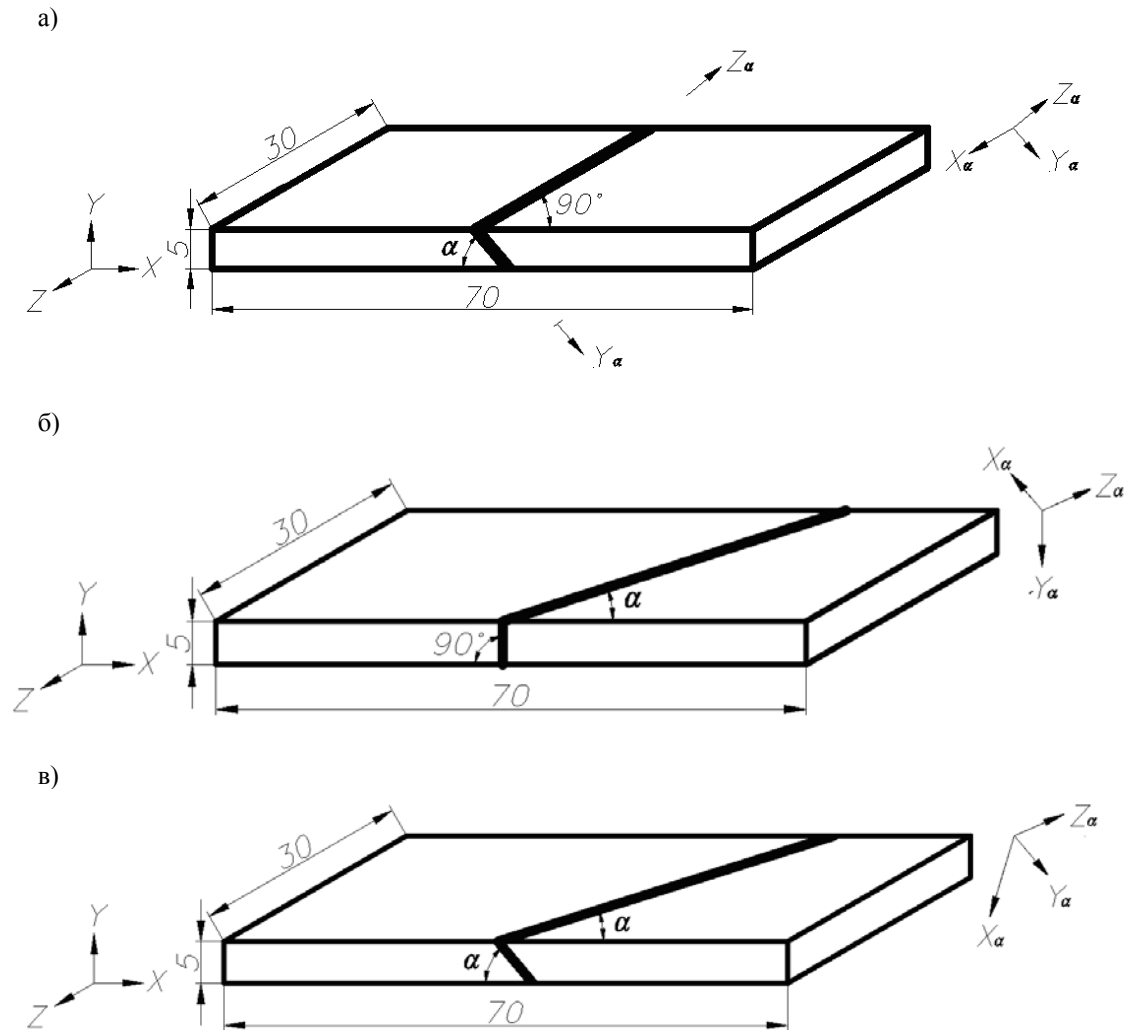


Рис. 1. Схемы паяных косостыковых соединений: а – скошенного по толщине деталей; б – скошенного по ширине деталей; в – скошенного как по толщине, так и по ширине соединяемых деталей

Для анализа несущей способности паяных соединений, разрушающихся по шву, особенно важно знать величину напряжений, действующих по площадкам, которые ориентированы по плоскости стыка. В табл. 1...3 приведены расчетные данные о величине нормальных и каса-

тельных напряжений, действующих в плоскости скоса (они отмечены индексом  $\alpha$ ). Направление осей для площадок показано на рис. 1. Во всех типах соединений (см. рис. 1) плоскость стыка совпадает с координатной плоскостью  $Y_\alpha - Z_\alpha$ . В паяном соединении, имеющем скос по ши-

рине деталей (рис. 2), эквивалентные, нормальные и касательные напряжения распределены столь же равномерно, как и в соединении, скошенном по толщине. Разброс расчетных значений не превышал 10 %. Практически полностью совпадают и численные данные (см. табл. 1 и 2) по уровню всех составляющих напряжений. Это является свидетельством эквивалентности сравниваемых типов

косостыковых соединений по критерию несущей способности. То есть косостыковые соединения со скосом, выполненным по ширине пластины, являются эквивалентными аналогичным соединениям, скошенным по толщине, при условии, что у них совпадают углы наклона плоскостей стыков к оси соединения (рис. 3).

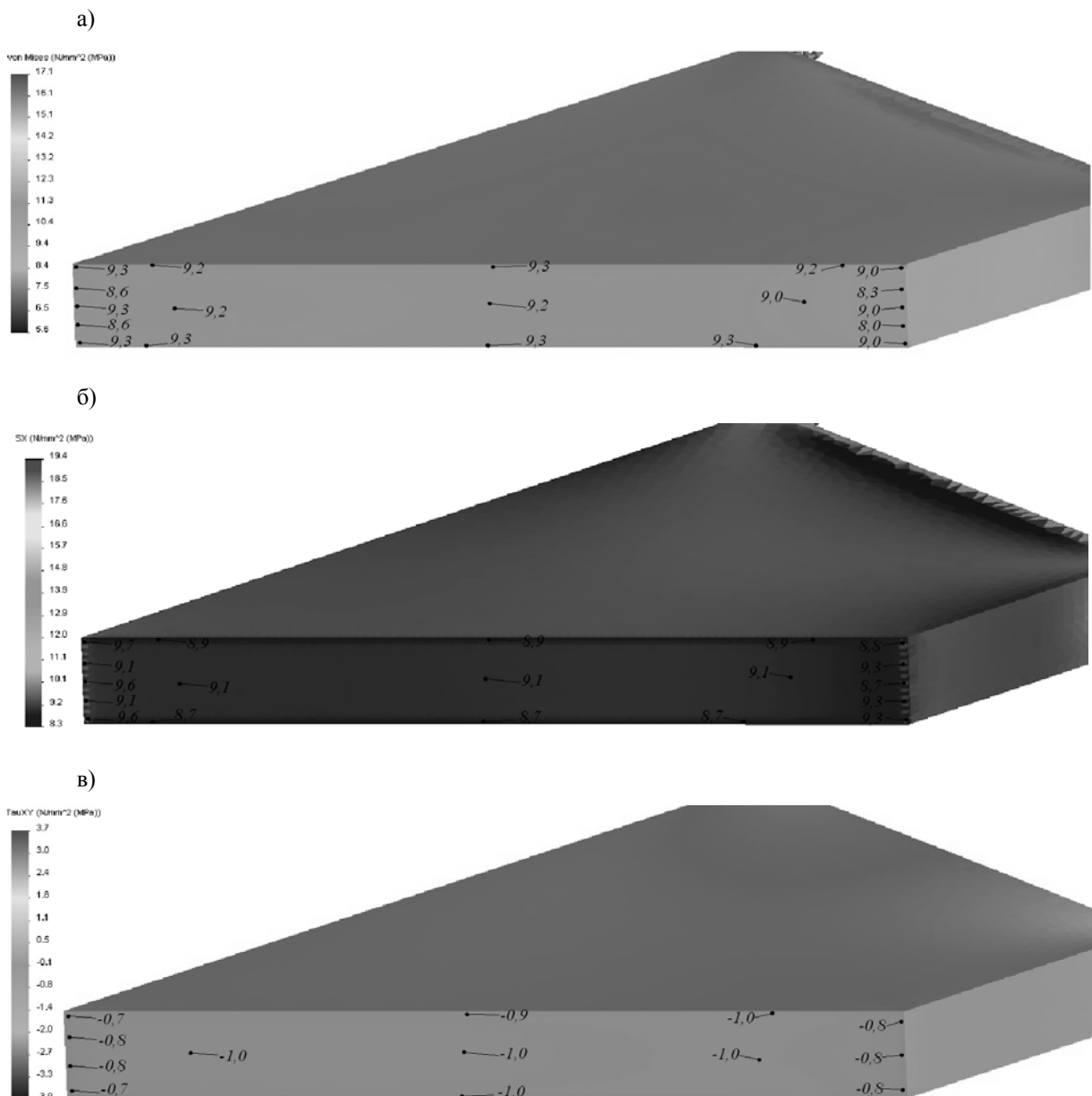


Рис. 2. Распределение эквивалентных (а), нормальных (б) и касательных (в) напряжений в паяном шве косостыкового соединения, имеющего скос по ширине соединяемых пластин

Табл. 1. Зависимость величины напряжений в паяном шве косостыкового соединения, имеющего скос по толщине деталей

Напряжение	Величина напряжений, МПа, при угле наклона плоскости стыка			
	90°	60°	45°	30°
$\sigma_y$	7,0...8,0	8,9...9,2	8,7...9,5	6,2...8,3
$\sigma_x$	9,0...10,1	9,1...10,2	8,7...10,2	5,9...8,1
$\sigma_y$	0,5...3,0	0,1...0,4	-1,2...0	-1,3...0,1
$\sigma_z$	1,0...3,1	1...2,3	0,9...2,0	0,4...1,5
$\tau_{xy}$	-0,3...0,3	-0,2...0,1	0,5...0,9	0,6...1,9
$\tau_{xz}$	-0,35...0,35	-0,3...0,2	-0,1...0,1	-0,1...0,1
$\tau_{yz}$	-0,1...0,1	-0,1...0	-0,1...0,1	0
$\sigma_{x\alpha}$	-	7,2...7,5	4,6...5,6	2...3,1
$\sigma_{y\alpha}$	-	2,6...3,1	2,8...4,5	2,9...5,1
$\sigma_{z\alpha}$	-	1...2,3	0,9...2,1	0,4...1,5
$\tau_{xy\alpha}$	-	4,2...4,4	4,8...5,2	2,8...4,5
$\tau_{xz\alpha}$	-	-0,2...0,3	-0,2...0,2	-0,1...0
$\tau_{yz\alpha}$	-	-0,1...0,1	0	-0,1...0

Табл. 2. Зависимость величины напряжений в паяном шве косостыкового соединения, имеющего скос по ширине деталей

Напряжение	Величина напряжений, МПа, при угле наклона плоскости стыка		
	60°	45°	30°
$\sigma_y$	8,7...9,3	8,5...9,3	6,0...8,0
$\sigma_x$	9,3...10,2	8,5...9,8	6,0...8,0
$\sigma_y$	-0,2...0,5	-1,4...0,1	-1,3...0,2
$\sigma_z$	1...2,3	0,8...1,9	0,9...1,5
$\tau_{xy}$	0,2...0,4	-1...-0,6	-2,0...-0,6
$\tau_{xz}$	-0,2...0,4	-0,2...0,2	0...0,1
$\tau_{yz}$	-0,2...0,2	-0,2...0,2	-0,1...0
$\sigma_{x\alpha}$	6,8...7,5	4,5...5,4	2,2...3,0
$\sigma_{y\alpha}$	2,5...3,1	2,7...4,2	3,0...5,0
$\sigma_{z\alpha}$	1...2,3	0,8...1,9	0,4...1,5
$\tau_{xy\alpha}$	-4,4...4,1	4,6...5,1	2,9...4,4
$\tau_{xz\alpha}$	-0,4...0,2	-0,2...0,2	0...0,1
$\tau_{yz\alpha}$	0	-0,1...0,1	0

Табл. 3. Зависимость величины напряжений в паяном шве косостыкового соединения, имеющего скос как по ширине, так и по толщине деталей

Напряжение	Величина напряжений, МПа, при углах наклона плоскости стыка		
	60°	45°	30°
$\sigma_y$	8,9...9,5	7,6...8,7	5,7...6,9
$\sigma_x$	9,1...9,7	7,2...8,0	4,5...5,7
$\sigma_y$	-0,2...0,7	-0,2...0,2	-0,2...0,2
$\sigma_z$	-0,2...0,7	-0,4...0,4	-0,3...0,2
$\tau_{xy}$	-0,5...0,1	0,7...1,2	0,8...1,5
$\tau_{xz}$	-0,5...0,1	0,9...1,3	0,8...1,5
$\tau_{yz}$	-1,2...-0,6	-1,2...-0,6	-0,7...0
$\sigma_{x\alpha}$	6,7...7,7	3,2...3,4	1,1...1,5
$\sigma_{y\alpha}$	2,2...2,6	1,1...1,7	0,6...1,0
$\sigma_{z\alpha}$	-0,2...0,7	2,5...3,0	2,7...3,4
$\tau_{xy\alpha}$	-4...-3,4	-2,4...-2,0	0,9...1,3
$\tau_{xz\alpha}$	0...0,4	-4,2...-3,4	-3,4...-1,7
$\tau_{yz\alpha}$	0,6...1,2	0,9...1,5	-1,4...-0,8

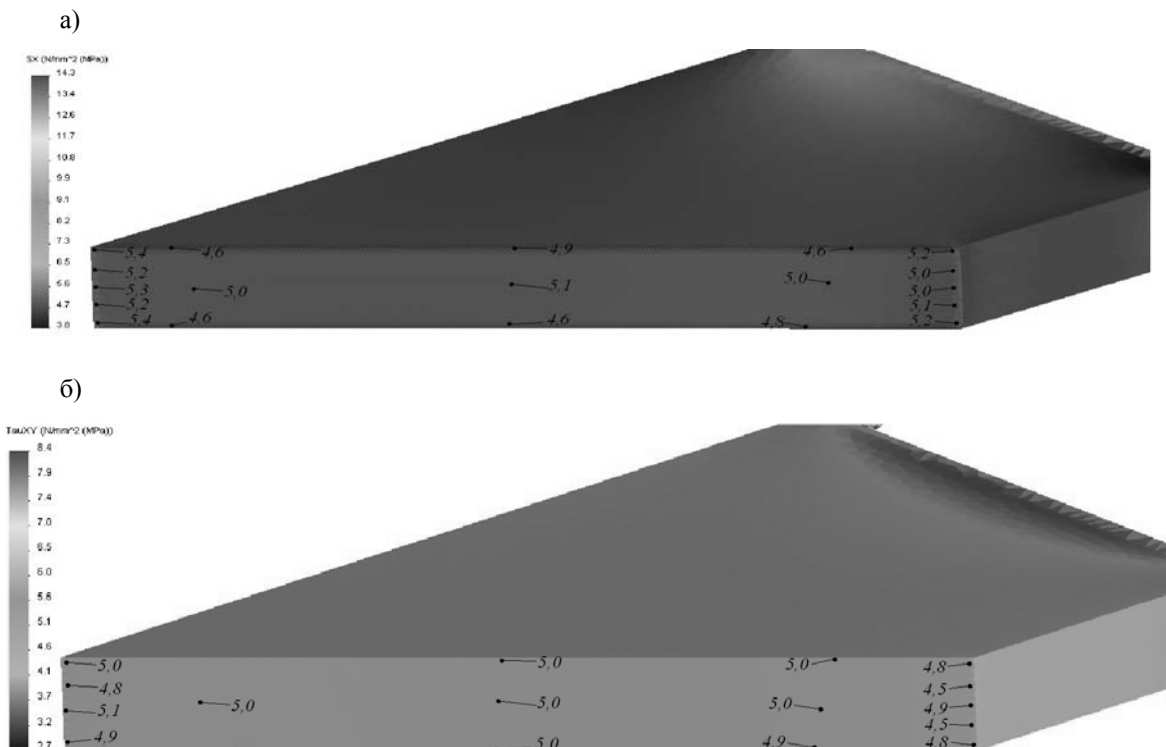


Рис. 3. Распределение нормальных (а) и касательных (б) напряжений в соединениях (см. рис. 1. б) по плоскости стыка

Анализируя данные (см. табл. 3), можно сделать вывод о том, что наличие в паяном соединении комбинированного скоса по толщине и ширине деталей действительно несколько снижает нагрузку, воспринимаемую косостыковым паяным швом. Так, уровень эквивалентных напряжений в соединении при одинаковых углах наклона, равных  $45^{\circ}$ , снижается с уровня 8,7...9,5 до 7,6...8,7 МПа, т. е. примерно на 12 %. Более заметным образом снижается уровень нормальных напряжений с 8,7...10,2 до 7,2...8,0 МПа, т. е. почти на 20 %. Еще более заметна разница в уровне касательных напряжений на площадке, совпадающей с плоскостью скоса. В соединении со скосом комбинированного типа они снижаются с уровня 4,8...5,2 до 3,4...4,2 МПа, что составляет 24 %.

Существенным недостатком паяных соединений, скошенных по ширине, является большой объем отходов, осо-

бенно при малых углах скоса. Поэтому данный прием может быть успешно реализован только при пайке узких полос. Для того чтобы расширить область возможного применения косостыковых соединений, авторами предлагается конструкция, показанная на рис. 4. Паяное соединение (зубчатое) (см. рис. 4) сохраняет все преимущества косостыковых соединений известных типов, но является более экономичным. При его выполнении можно использовать зубья двух типов: крупные (на рис. 4 они обозначены цифрой 1) или более мелкие (на рис. 4 обозначены цифрой 2). По мнению авторов, переход от зубьев типа 1 (крупномодульных) к зубьям типа 2 (мелкомодульным) уменьшает площадь смятия, приходящуюся на один зуб, но пропорциональным образом увеличивает количество зубьев. Поэтому несущая способность такого соединения зависит только от угла скоса плоскостей, образующих зуб.

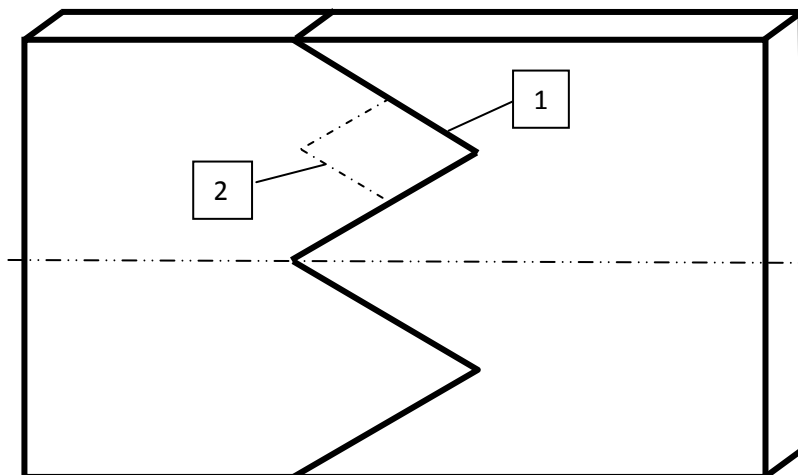


Рис. 4. Схема зубчатого стыкового паяного соединения

Распределение осевых напряжений в паяном соединении зубчатого типа показано на рис. 5. Оно характеризуется практически однородным распределением напряжений в основном металле и в паяном шве. Незначи-

тельная концентрация напряжений (меньше 10 %) наблюдается только у вершин зубьев такого соединения. Такой характер распределения рабочих напряжений свидетельствует о перспективности применения паяных со-

единений такого типа в изделиях различного назначения, работающих в ус-

ловиях воздействия не только статических, но и динамических нагрузок.

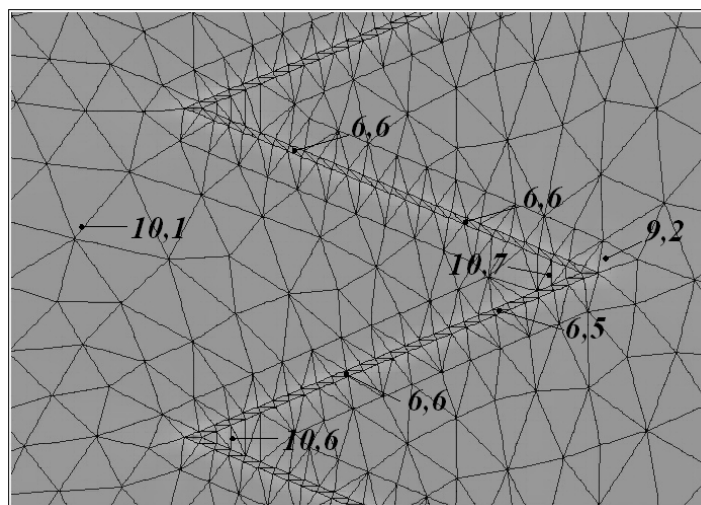


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в паяном соединении зубчатого типа. Угол в вершине зуба  $45^\circ$

При выполнении соединений зубчатого типа в вершинах и впадинах зубьев механическая обработка не может обеспечить строго линейного контакта секущих плоскостей. При этом практически неизбежны притупления и скругления в местах стыковки плоскостей. Поэтому было рассчитано также зубчатое соединение с наличием скруглений в вершинах зубьев и впадин. Результаты расчетов (рис. 6) свидетельствуют о том, что и при наличии такого рода скруглений поле рабочих напряжений остается достаточно однородным без резкой концентрации напряжений в основном металле.

Результаты конечно-элементного расчета не выявили каких-либо преимуществ в соединениях с углом скоса в  $45^\circ$  по сравнению с другими значениями этого угла. Так, величина эквивалентных напряжений при угле скоса  $45^\circ$  в соединении, скошенном по толщине (см. рис. 1, а), оказалась даже более высокой, чем в соединении, не имеющем скоса (8,5...9,3 МПа в скошенном паяном шве против 7,0...8,0 МПа в соединении без скоса). Осевые напряжения  $\sigma_x$  в со-

единении, скошенном по толщине под углом  $45^\circ$ , практически такие же, как и в соединении, не имеющем скоса. Касательные напряжения по наклонным площадкам, совпадающим с плоскостью стыка, для соединений с углом наклона в  $45^\circ$  вообще имеют максимальные значения. Таким образом, полученные в работе результаты свидетельствуют о некорректности вывода авторов [2] о максимальной прочности косостыковых соединений с углом скоса  $45^\circ$ .

Косостыковые соединения при пайке труб выполняют с помощью подготовки кромок в виде конических поверхностей [6–10]. По мнению авторов, здесь возможны также схемы, в которых паяный стык является плоским (рис. 7). Такое выполнение паяного косостыкового соединения придает ему более высокие характеристики работоспособности при воздействии крутящего момента, т. к. при работе на кручение максимальные напряжения будут возникать не в паяном шве, а в основном металле. Предпосылки к этому создает отсутствие осевой симметрии паяного шва в конструкции соединения.

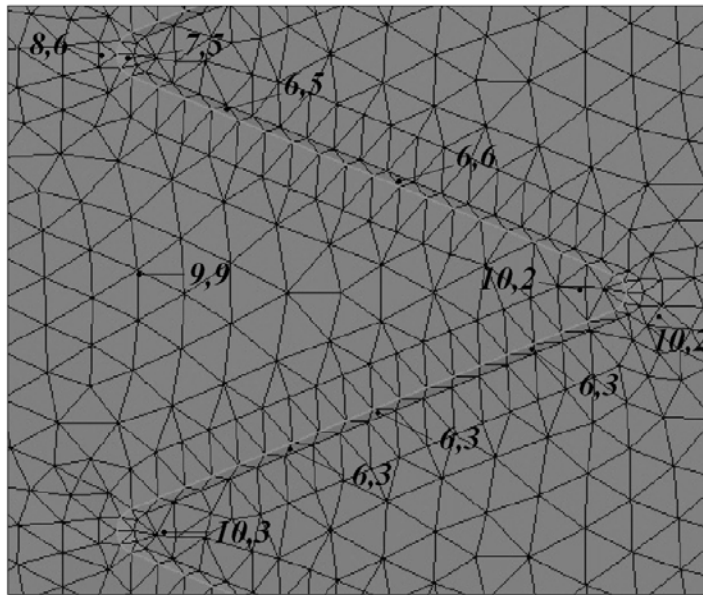


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в паяном зубчатом соединении с закруглениями вершин зубьев

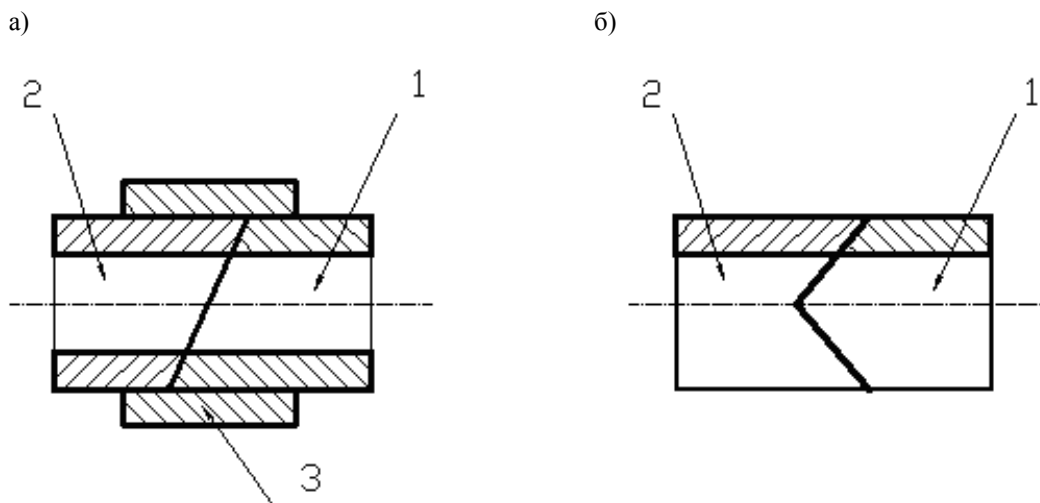


Рис. 7. Схема косостыковых паяных соединений труб: а – с одной плоскостью стыка; б – с двумя плоскостями; 1, 2 – соединяемые трубы; 3 – муфта

### Выводы

1. Показано, что паяные косостыковые соединения, имеющие скосы по ширине соединяемых пластин, по несущей способности эквивалентны аналогичным соединениям, скошенным по толщине, при условии равенства углов скоса.

2. Предложены косостыковые

паяные соединения зубчатого типа и доказано, что они обеспечивают высокую степень равномерности полей рабочих напряжений.

3. Доказано, что косостыковые паяные соединения с углом скоса  $45^{\circ}$  не обладают повышенной несущей способностью по сравнению с соединениями с другими углами скоса.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гржимальский, Л. Л. Технология и оборудование пайки / Л. Л. Гржимальский, И. И. Ильевский. – М. : Машиностроение, 1979. – 240 с.
2. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г. А. Николаев, В. А. Винокуров. – М. : Высш. шк., 1990. – 446 с.
3. Цумарев, Ю. А. Сравнительная оценка прочности паяных соединений со скошенными кромками / Ю. А. Цумарев, Е. В. Игнатова, Е. Ю. Латыпова // Сварочное производство. – 2011. – № 11. – С. 34–38.
4. Лоцманов, С. Н. Руководство по пайке металлов / С. Н. Лоцманов. – М. : ОБОРОНГИЗ, 1960. – 193 с.
5. Цумарев, Ю. А. Критериальный подход к созданию конструктивных форм паяных соединений / Ю. А. Цумарев // Сварочное производство. – 2010. – № 3. – С. 34–38.
6. Экзотермическая пайка труб из стали 20 в условиях ремонта паровых котлов / Ю. П. Данилов [и др.] // Сварочное производство. – 1987. – № 7. – С. 16–18.
7. Дашдамиров, Т. Д. Оптимизация основных параметров процесса пайки нефтепромысловых труб / Т. Д. Дашдамиров, А. Н. Нуриев, Б. В. Торопов // Сварочное производство. – 1978. – № 2. – С. 33–34.
8. Дашдамиров, Т. Д. Соединение обсадных труб в колонну индукционной пайкой / Т. Д. Дашдамиров, В. В. Карабанов // Сварочное производство. – 1988. – № 11. – С. 8–9.
9. Карабанов, В. В. Индукционная пайка косостыковых соединений труб / В. В. Карабанов, О. К. Бохоров // Сварочное производство. – 1992. – № 5. – С. 5–6.
10. Карабанов, В. В. Газопламенная пайка косостыковых соединений труб / В. В. Карабанов // Сварочное производство. – 1993. – № 7. – С. 13–15.

*Статья сдана в редакцию 11 апреля 2012 года*

**Юрий Алексеевич Цумарев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-21-80. E-mail: u\_tsumarev@mail.ru.

**Виктор Александрович Попковский**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-22-08-38.

**Екатерина Валентиновна Игнатова**, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-24-94. E-mail: 123kate@mail.ru.

**Yury Alekseyevich Tsumarev**, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-25-21-80. E-mail: u\_tsumarev@mail.ru.

**Viktor Aleksandrovich Popkovsky**, PhD, Associate Professor, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-22-08-38.

**Yekaterina Valentinovna Ihnatava**, PhD, student, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0222-25-24-94. E-mail: 123kate@mail.ru.