
©БРУ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Е. В. ИГНАТОВА, Ю. А. ЦУМАРЕВ

The deformation mode of the butt-soldered joint with plates is considered. It is shown, that a unilateral plate introduced into the structure of butt-soldered joint, reduces its strength as a result of loading it eccentrically by the longitudinal force. Comparison of butt-soldered joints of various designs on nature of distribution of working stress is carried out. The design of butt-soldered joint of gear type is offered and is carried out it which showed insignificant concentration of stress in joints of such design

Ключевые слова: паяные соединения стыкового типа, несущая способность, концентрация напряжений, изгиб, зубчатое паяное соединение

Пайка является важной составной частью промышленного комплекса Республики Беларусь. Ее широко применяют во многих отраслях промышленности, особенно при получении неразъемных соединений цветных металлов и разнородных материалов, а также заготовок, имеющих защитное покрытие. Постоянно растет объем выпуска паяных изделий и технологических материалов для пайки [1, 2]. С ее использованием во многом связан прогресс в таких отраслях техники, как ракетостроение, криогенная техника, электроника, электротехника и энергетика, а также химическая промышленность. Это обусловлено тем, что применение пайки позволяет создавать новые, более совершенные конструкции машин. В литературных источниках имеются данные, которые показывают, что по объемам применения техника пайки опережает в промышленно развитых странах такие секторы рынка, как техника термического напыления, сварочные роботы и техника термической резки [3].

Особенностью пайки как технологического процесса является наличие жидкой фазы, минимальное ее количество и сравнительно низкие температуры нагрева, меньшие, чем температуры автономного плавления любого из соединяемых материалов [4, 5]. Это позволяет разрабатывать ресурсосберегающие технологические процессы, в которых органично сочетаются преимущества сварки плавлением и сварки давлением.

Современные тенденции развития пайки направлены на разработку и внедрение современных технологических процессов, материалов, методик расчета паяных конструкций и новых вариантов конструктивного оформления изделий [6, 7]. При этом проблема повышения технического уровня паяных конструкций должна решаться в значительной степени путем сокращения их материалоемкости. Ре-

результаты анализа литературных источников показывают, что наиболее быстрое развитие имеет место в области технологии высокотемпературной пайки и материалов, используемых для этой цели. В то же время, высокотемпературная пайка повышает энергоемкость процесса, увеличивает уровень термических напряжений, вызывает в соединяемых материалах сложные необратимые физико-химические процессы, которые часто обесценивают исходные свойства материалов [8,9]. Особенно заметны недостатки высокотемпературной пайки при соединении материалов с защитными покрытиями.

Для повышения работоспособности соединений, выполненных низкотемпературной пайкой, необходимы новые конструктивные элементы паяных соединений. Однако сведения о таких разработках практически полностью отсутствуют. Таким образом, создание новых конструктивных элементов, обладающих повышенной несущей способностью, остается актуальной задачей.

Для дальнейшего развития пайки и улучшения экономических показателей этого процесса, прежде всего, необходимо исследовать напряженное состояние паяных соединений и произвести поиск новых конструктивных элементов для них.

Специалистами отмечается низкая прочность стыковых паяных соединений, особенно при низкотемпературной пайке [5] и предлагаются конструктивные решения, направленные на повышение их несущей способности. В частности, в работе [5] отмечается, низкая прочность паяных стыковых пластинчатых соединений, а соединения с увеличенной площадью спая при сочетании нахлестки и стыка рассматриваются как более прочные. Одним из таких более прочных паяных соединений, по мнению авторов работы [5], является стыковое паяное соединение с накладкой, схематично показанное здесь на *рисунке 1*. Однако приведенные в работах [5,10] оценки работоспособности стыковых паяных соединений с накладкой нельзя признать корректными, т.к. они не учитывают, что дополнение паяного соединения односторонней накладкой лишает его симметрии и коренным образом изменяет характер напряженного состояния. В паяном соединении с односторонней накладкой создается напряженное состояние внецентренного растяжения.

Внецентренное растяжения может оказать заметное влияние на распределение рабочих напряжений и несущую способность паяного соединения, но в практике пайки до настоящего времени не рассматривалось.

Чтобы получить наглядную и более подробную картину распределения рабочих напряжений в паяном соединении с накладкой, было проведено исследование его напряженного состояния, основанное на методе конечных элементов и пакете прикладных программ «SOLID WORKS». Было рассчитано напряженно-деформированное состояние в паяном соединении стальных пластин толщиной $\delta = 6$ мм и шириной $b = 40$ мм. Толщина накладки составляла $c = 3$ мм, толщина припоя 0,2 мм. В качестве материала припоя был взят кадмий. При анализе полученных в расчете данных сравнивали распределение интенсивности напряжений, т.к. стыковой паяный шов испытывает объемное напряженное состояние [11]. Полученное в результате расчета распределение интенсивности напряжений показано на *рисунке 2*. Эти результаты полностью подтвердили предварительный вывод о вредном влиянии накладки. Во-первых, на *рисунке 3* хорошо видно, что как накладка, так и прикрепляющий ее паяный шов практически свободны от напряжений и не воспринимают заметной нагрузки. При этом отчетливо выражена деформированная форма соединения, характерная для изгиба (см. *рисунк 3*). Интенсивность напряжений в накладке изменяется в пределах от 0,16 до 4,15 МПа, тогда как приложенные напряжения составляют 10 МПа. При этом на стороне, свободной от накладки в паяном шве они достигают величины 7,8 МПа, а в аналогичном соединении без накладки интенсивность напряжений в паяном шве составляла только 5,9 МПа, т.е., в 1,3 раза меньше.

Для получения сравнительных данных и более обоснованных рекомендаций по упрочнению паяных соединений стыкового типа кроме односторонней накладки нами был произведен расчет аналогичного, но симметричного соединения с двумя накладками. Результаты расчета приведены на *рисунке 4*. Они показывают, что симметричное расположение накладок полностью устранило вредное влияние изгиба и обеспечило частичную разгрузку стыкового паяного шва. Интенсивность напряжений в стыковом паяном шве при установке двух накладок снизилась с 5,9 МПа до 3,16 МПа, т.е. в 1,87

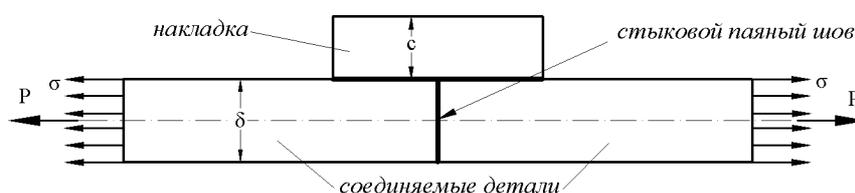


Рис. 1. Схема стыкового паяного соединения с накладкой

раза. По сравнению с соединением, имеющим одностороннюю накладку, симметричное соединение с двумя накладками оказалась прочнее в 2,47 раза, что позволяет рекомендовать его для использования в паяных конструкциях.

Расчетным путем было установлено, что геометрические размеры накладок оказывают влияние на прочность стыковых паяных швов и путем подбора их толщины можно добиваться требуемых показателей по прочности соединения в целом, а также обеспечивать его равнопрочность.

В литературных данных отсутствуют рекомендации по расчету и выбору толщины накладок. Однако на основании результатов, полученных в результате данных исследований, представленных на *рисунке 4*, можно заметить, что распределение напряжений по толщине в месте установки накладок достаточно равномерное. Следовательно, степень разгрузки центральной части, соединенной стыковым швом, будет пропорциональна общей толщине основного металла вместе с накладками. Таким образом, установив симметричные накладки, толщина каждой из которых равна толщине основного металла, можно прогнозировать 3-х кратное снижение уровня напряжений в стыковом паяном шве.

Стыковые паяные соединения являются наименее изученным с точки зрения распределения эксплуатационных напряжений типом паяных соединений и требуют более детального исследования зависимости прочности от конструктивных особенностей соединения [5,10].

Для детального исследования напряженного состояния паяных стыковых соединений пластин были использованы расчетные методы, основанные на методе конечных элементов и пакета программ «SOLID WORKS». В качестве припоя был использован кадмий. Нагрузка составила 10 МПа.

Проведенные расчеты показали, что распределение напряжений в паяных стыковых соединениях не зависит от характера выполнения скоса стыкуемых плоскостей в них (*рисунок 5*), а определяется только углом этого скоса. Стыковые паяные соединения, скошенные по толщине, ширине соединяемых пластин, не склонны к какой-либо концентрации напряжений при воздействии на них продольной эксплуатационной нагрузки. Их несущая способность определяется только углом наклона скошенных поверхностей по отношению к направлению действия нагрузки и возрастает по мере уменьшения этого угла.

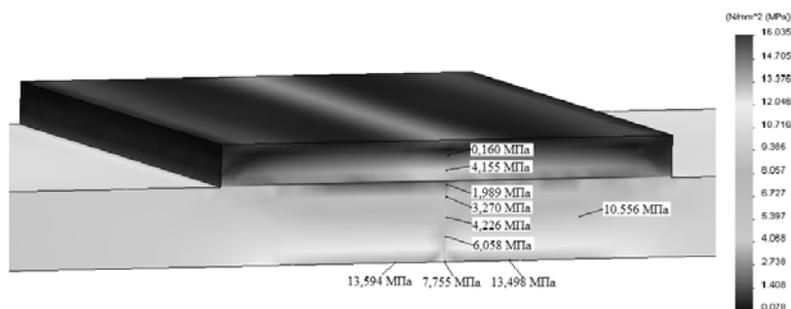


Рис.2. Распределение напряжений в паяном соединении с накладкой

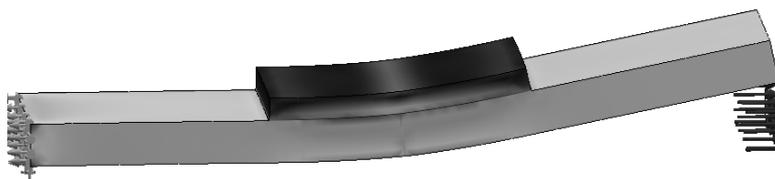


Рис.3. Деформированная форма паяного соединения с накладкой

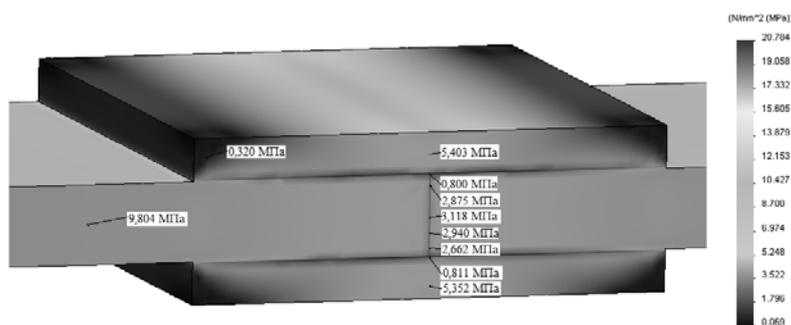


Рис.4. Распределение напряжений в стыковом паяном соединении с двумя симметрично установленными накладками

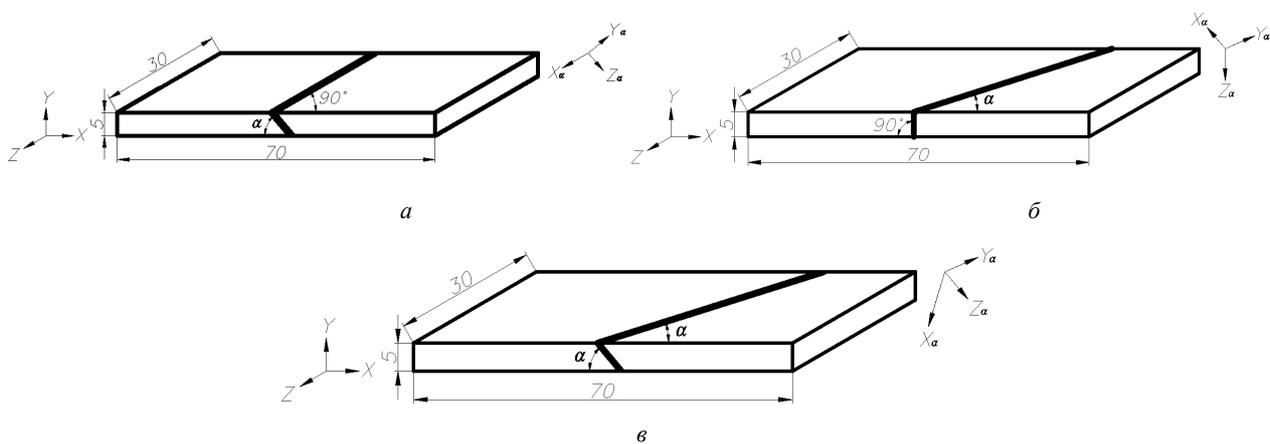


Рис. 5. Паяное соединение скошенное:
 а – по толщине, б – ширине, в – толщине и ширине

Значения рабочих напряжений в зависимости от угла и плоскости скоса показаны занесены в таблицы 1–3.

Так же полученные результаты дали возможность разработать новую конструкцию соединения с зигзагообразным паяным швом (рисунок б), которая обеспечивает высокую статическую прочность и обладает комплексом свойств, необходимых для эффективной работы в условиях воздействия циклических и ударных нагрузок, особенно в виде числе крутящих моментов.

На рисунке 7 представлены поля напряжений, для стыкового зигзагообразного соединения пластин при $\alpha=22,5^\circ$.

Таблица 1. Распределение напряжений в паяном шве косостыкового соединения скошенного по толщине

Угол наклона	90°	60°	45°	30°
Напряжение				
σ_z	5,9–7,2	8,7–9	9,1–9,5	7,6–8,1
σ_x	10	10	8,5–9,5	5,3–7,2
τ_{xy}	0	0	1,3–1,4	1,4–2,7
$\sigma_{x\alpha}$	–	6,9–7,5	4,9–5,8	2,4–3,5
$\sigma_{y\alpha}$	–	2,6–3,2	3,3–4	1,2–4,5
$\sigma_{z\alpha}$	–	2,4–3,2	2,2–2,9	1–1,2
$\tau_{xy\alpha}$	–	4,2–4,3	4,5–5,3	2,7–4,7

Таблица 2. Распределение напряжений в паяном шве косостыкового соединения скошенного по ширине

Угол наклона	60°	45°	30°	Угол наклона
Напряжение				Напряжение
σ_z	8,7–9	8,6–9,2	6,4–7,6	σ_z
σ_x	10,2	8,4–9,6	5,1–7,3	σ_x
τ_{xy}	0	1,3–1,4	1,9–2,7	τ_{xy}
$\sigma_{x\alpha}$	6,8–7,8	4,8–5,6	2,5–3,3	$\sigma_{x\alpha}$
$\sigma_{y\alpha}$	2,6–3,2	2–3,5	1,3–3,7	$\sigma_{y\alpha}$
$\sigma_{z\alpha}$	2,1–3,1	2,1–2,9	1,1–2	$\sigma_{z\alpha}$
$\tau_{xy\alpha}$	4,3	4,3–5,1	3,7–4,3	$\tau_{xy\alpha}$

Таблица 3. Распределение напряжений в паяном шве косостыкового соединения скошенного по толщине и ширине

Угол наклона	60°	45°	30°	Угол наклона
Напряжение				Напряжение
σ_z	8,8–9,4	8,3–9	5,8–6,5	σ_z
σ_x	9–9,5	6,4–7	3,4–3,8	σ_x
τ_{xy}	0	1,4–1,7	1,6–2,2	τ_{xy}
$\sigma_{x\alpha}$	6–6,1	3,3–3,4	1,4–1,5	$\sigma_{x\alpha}$
$\sigma_{y\alpha}$	1,9–2,6	1–1,5	0,4–0,8	$\sigma_{y\alpha}$
$\sigma_{z\alpha}$	2,3–2,6	1,5–2,3	0,8–1,4	$\sigma_{z\alpha}$
$\tau_{xy\alpha}$	2,4–3	1,6–2,5	0,7–1,3	$\tau_{xy\alpha}$

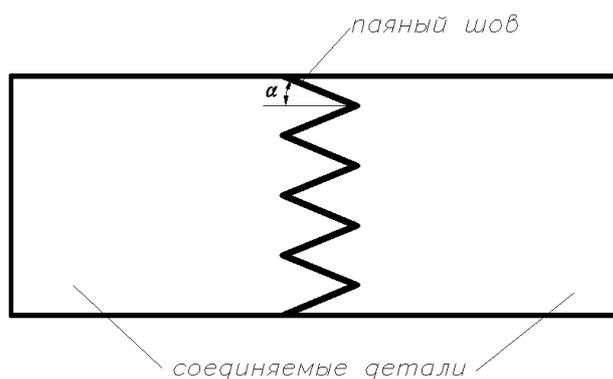


Рис. 6. Зигзагообразное стыковое паяное соединение

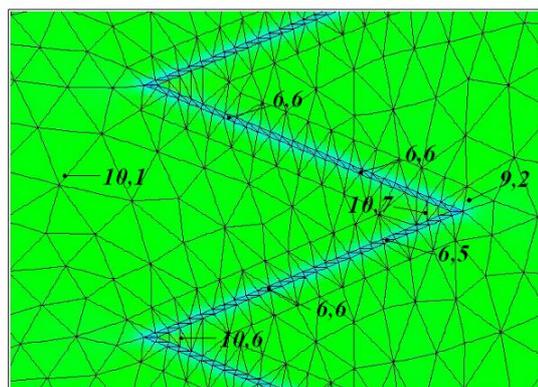


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в припое и основном металле

Данный тип соединения может быть использован для соединения труб. Он обеспечивает герметичность, равнопрочность основного металла и паяного шва. Следует также отметить, что наличие зубцов способствует хорошей работе паяного соединения при воздействии крутящего момента. Поэтому конструкция такого типа является весьма перспективной для соединения обсадных труб при бурении скважин на нефть и газ.

Выводы:

1. Установлено, что односторонняя накладка, вводимая в конструкцию стыкового паяного соединения, снижает его прочность из-за внецентренного нагружения продольной силой;
2. Показано, что для повышения прочности паяного стыкового соединения необходимо применять симметрично установленные накладки, варьируя размерами которых можно добиваться требуемой прочности соединения в целом и равнопрочности отдельных его конструктивных элементов.
3. Установлено, что косостыковые паяные соединения обеспечивают практически равномерное распределение рабочих напряжений с минимальной их концентрацией. На базе проведенных расчетов предложена конструкция паяного соединения труб.
4. Разработаны новые конструкции паяных соединений с повышенной несущей способностью, основанные на комбинации нахлесточных соединений с косостыковыми

Литература

1. Рагунович С.П. Первоочередные задачи реализации концепции развития сварочного производства Республики Беларусь на 2001 – 2005 г.г. / С.П. Рагунович, В.К. Шелег // Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения : материалы 2 – го междунар. симпозиума. М, 2001. С. 20 – 25.
2. Вернадский В.Н., Маковецкая О.К. Сварочное производство и рынок сварочной техники в современной экономике // Сварочное производство. 2007. № 2. С. 43 – 47.
3. Миддельдорф К., Д. фон Хофе. Тенденции развития технологий соединения материалов // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 39 – 47.
4. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Особенности и перспективы развития пайки.// Саратов: Издательство Саратовского университета, 1973.-226 с.
5. Лашко С.В. Лашко Н.Ф. Пайка металлов // М.: Машиностроение, 1967.- 367 с
6. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
7. Прохоров Н.Н. Повышение эффективности и надежности сварных конструкций – один из основных резервов научно-технического прогресса // Сварочное производство, 1987. № 7. С. 37 – 40.
8. Фридкин В.М. Принципы формообразования в теории линейно протяженных сооружений // М.: Ладья, 2006.- 512 с.
9. Фридкин В.М. Методологические подходы к разработке конструктивных форм большепролетных и сверхпротяженных инженерных сооружений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.-М.: 2008 г.
10. Кузнецов, О.А. Прочность паяных соединений / О.А. Кузнецов, А.И. Погалов // М.: Машиностроение.- 1987.- 112 с.
11. Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование // М.: Высшая школа.- 1990.- 446 с.