

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ

Е.Н. ЦУМАРЕВ, Т.С. ЛАТУН

The paper deals with rational design methods in the manufacture of structures for fusion welding and resistance spot welding. Performed finite-element analysis of the stress-strain state of lap welds and welded T-joints with interrupted sutures, and the welded joints made of the resistance spot welding. The problems of rational design of one-piece brazed and welded joints and connections combined type

Ключевые слова: сварные и паяные соединения, фланговые и лобовые швы, изгиб, гибридное соединение, концентрация напряжений

Развитие техники на современном этапе в значительной мере связано с совершенствованием процессов создания неразъемных соединений. Это обусловлено постоянным усложнением условий эксплуатации изделий, созданием новых, более совершенных материалов для их изготовления, а также тенденцией к постоянному повышению уровня проектных решений во всех областях техники. Возрастают также требования к более рациональному использованию ресурсов, используемых при соединении деталей [1].

Технологические процессы сварки и пайки в настоящее время составляют основу техники создания неразъемных соединений. Это особенно заметно в области совершенствования технологии и оборудования, тогда, как техника конструирования соединений пока не получила заметного развития. Поэтому в настоящее время сварка является весьма энергоемким и ресурсоемким технологическим процессом [2], а в сварных соединениях отмечается чрезмерное количество наплавленного металла [3]. Чтобы повысить качество проектирования металлических конструкций и тем самым обеспечить не только решение задач ресурсосбережения, но и устранить важнейший фактор преждевременного их разрушения необходимо более широко использовать математическое моделирование полей напряжений. В первую очередь это касается соединений с угловыми швами, доля которых в общем объеме сварных соединений составляют не менее 70% [4]. Отсутствие прогресса в этом важном направлении заставляет разработчиков металлических конструкций решать те или иные вопросы реального конструирования неразъемных соединений экспериментальным путем, что неоправданно увеличивает сроки подготовки производства и его издержки. При этом не удается достигнуть оптимальных характеристик работоспособности изделий. В данной работе предполагается устранить этот пробел и разработать ряд новых конструктивных элементов для сварных и паяных соединений на базе математического моделирования с использованием метода конечных элементов и пакетов прикладных программ.

Нахлесточные сварные соединения находят широкое применение при производстве сварных конструкций благодаря своей технологичности, поэтому анализ их напряженно-деформированного состояния является актуальной задачей. Однако широко распространенная схема нагружения, в которой сварное соединение рассматривается как свободное твердое тело, находящееся под действием пары сил (рисунк 1) не соответствует принципу статического равновесия рассматриваемой системы.

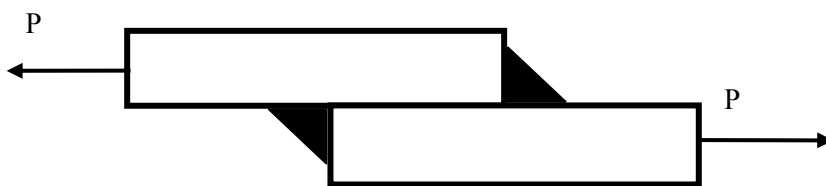


Рис. 1 – Расчетная схема сварного нахлесточного соединения, находящегося под действием пары сил

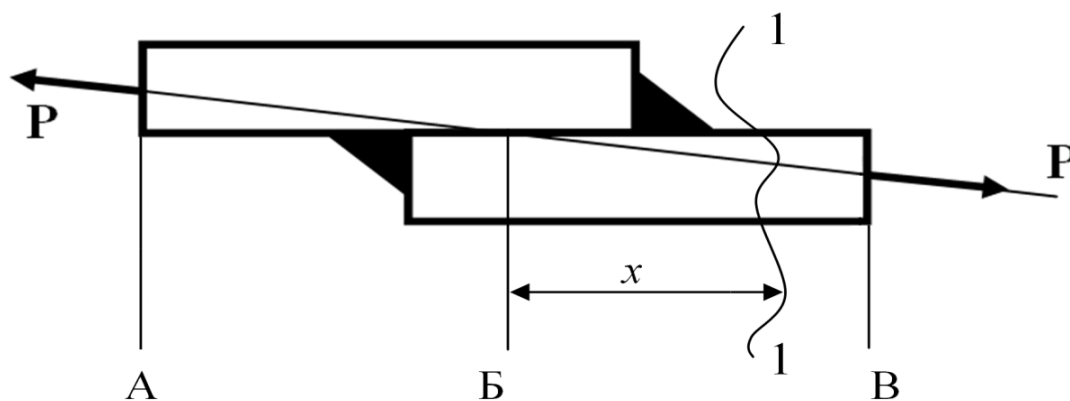


Рис. 2 – Расчетная схема сварного нахлесточного соединения, соответствующая принципу статического равновесия

Чтобы частично устранить имеющиеся пробелы нами были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния нахлесточных соединений различной конструкции. При этом был использован программный комплекс SOLID WORKS, а также схема нагружения, которая предложена в работе [5] и показана здесь на рисунке 2.

Для получения сравнительных данных проведены расчеты напряженно-деформированного состояния различных сварных соединений с продольными швами. Чтобы оценить влияние изгиба, были рассчитаны нахлесточные сварные соединения, которые отличались величиной расстояния между осями свариваемых пластин. Уменьшение расстояния между осями свариваемых пластин в соединении, было достигнуто за счет выполнения скоса в каждой из упомянутых пластин в области нахлестки. Кроме нахлесточных было рассчитано сварное крестовое соединение [6], свободное от изгибных напряжений. Поскольку в крестовом соединении содержится не два, а четыре продольных угловых шва, их катет при проведении расчетов был уменьшен в 2 раза, что позволило получить сопоставимые результаты.

Полученные данные подтверждают предположение о значительном влиянии, которое оказывает конструкция соединения с продольными швами на уровень максимальных напряжений в этих швах. Даже частичное устранение изгиба, которое обеспечивает конструкция со скосом кромки, способствует снижению максимального уровня нормальных, касательных и эквивалентных напряжений в 1,34, 1,32 и 1,38 раза соответственно. Полное устранение изгиба соединяемых пластин, достигаемое в крестовом соединении, еще больше снижает максимальные значения рабочих напряжений (нормальных в 2,33 раза, касательных – в 2,16 раза и эквивалентных – в 1,99 раза).

Обращаем внимание, что соединение крестового типа, содержащее 4 продольных угловых шва с катетом 2,5 мм требует в два раза меньшего объема наплавленного металла и соответственно является более экономичной.

В сварном соединении с фланговыми швами величина нахлестки определяет длину угловых сварных швов. Поэтому здесь она является важнейшим конструктивным параметром, который учитывается в расчетах на прочность [7]. Для соединений с лобовыми швами действующие стандарты предусматривают несколько иной подход. Величина нахлестки в них рассматривается, как чисто справочный размер. По нашему мнению, такой подход не вполне обоснован и требует корректировки т.к. от величины нахлестки зависит смещение линии действия приложенных сил P от центра тяжести сечения отдельной пластины. Поэтому нахлестка должна оказывать значительное влияние на величину напряжений, обусловленных изгибом, а, значит, и на величину суммарных рабочих напряжений. Для определения степени такого влияния в данной работе были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния однотипных нахлесточных сварных соединений с лобовыми швами, отличающихся друг от друга только величиной нахлестки.

Полученные результаты подтвердили предположение о значительном влиянии величины нахлестки на уровень максимальных рабочих напряжений в нахлесточном соединении с лобовыми швами. С увеличением нахлестки от 3 мм до 30 мм максимальная интенсивность напряжений в соединении уменьшается с 62,9 МПа до 45 МПа, т.е. в 1,4 раза. Следовательно, столь значительные изменения уровня рабочих напряжений требуют изменения существующего подхода к назначению величины нахлестки, чтобы не допустить резкого снижения несущей способности сварного соединения.

В практике изготовления сварных конструкций находят применения нахлесточные и тавровые сварные соединения с прерывистыми швами [7]. Обоснованием необходимости применения таких сварных швов является экономия ресурсов и снижение себестоимости изготовления, достигаемое за счет уменьшения объема слабо нагруженных сварных швов. Однако такой подход к достижению высоких показателей экономичности нуждается в определенном уточнении.

В опубликованных литературных данных нет сведений об особенностях напряженного состояния таких соединений, что придает актуальность любым попыткам пролить свет на эти особенности. В качестве исходной гипотезы можно сделать предположение о наличии значительной концентрации рабочих напряжений в крайних точках каждого из прерывистых швов, входящих в конструкцию отдельного соединения. Возможность такой концентрации обусловлена сгущением сплошного силового потока при разветвлении той его части, которая приложена в областях, соответствующих промежуткам между отдельными элементарными швами.

Основные размеры угловых сварных швов определяют расчетом из условия прочности, описываемого общеизвестным соотношением:

$$\frac{P}{\beta L k} \leq [\tau'] \quad (1)$$

где P – нагрузка, воспринимаемая прерывистым швом; β – коэффициент, учитывающий глубину проплавления и зависящий от способа сварки; L – суммарная длина всех участков прерывистого шва; k – катет углового сварного шва.

Используя данное соотношение можно рассмотреть два равнопрочных шва, размеры которых будут связаны соотношением:

$$L_1 k_1 = L_2 k_2. \text{ Если } k_1 = n k_2 \ (n > 1), \text{ то } L_2 = L_1 / n, \quad (2)$$

Сравним объемы сплошного и прерывистого швов

$$V_1 = 0,5 k_1^2 L_1; \quad V_2 = 0,5 k_2^2 L_2 = 0,5 \frac{k_1^2}{n^2} L_1 n = \frac{V_1}{n}, \quad (3)$$

Последнее соотношение показывает, что сплошной шов имеет меньший объем, чем прерывистый. Поэтому применение прерывистых швов с экономической точки зрения может быть оправдано только в том случае, когда сплошной шов будет недогруженным даже при минимально возможном значении катета шва (по данным Г.А. Николаева [7] оно составляет 3 мм). Однако здесь следует учитывать концентрацию напряжений, обусловленную наличием непроваренных участков, их пониженную коррозионную стойкость, а также более низкое качество начальных и конечных участков каждого из прерывистых швов.

Для выявления концентраторов напряжений и оценки степени их опасности были проведены расчеты конечно-элементных моделей сварных тавровых соединений, разработанных для прерывистого шва с катетом 8 мм, а также для сплошного шва катетом 4 мм. Уменьшение катета сплошного шва сопровождалось увеличением общей длины проваренных участков в полном соответствии с соотношением (3).

Результаты показали, что с уменьшением катета сварных швов с 8 мм до 4 мм при замене прерывистого шва сплошным максимальные эквивалентные напряжения в них уменьшаются с 10,2 МПа до 3,22 МПа (в 3,17 раза).

Отметим, что объем сплошного шва составляет 4800 мм³, что в 2 раза меньше объема прерывистого шва катетом 8 мм. Уровень максимальных касательных напряжений в соединении сплошным швом составил 1,44 МПа (в 2,53 раза меньше, чем у прерывистого шва катетом 8 мм), а уровень нормальных напряжений снизился до величины 2,87 МПа (в 2,96 раза).

Таким образом, результаты проведенных теоретических исследований показали, что по технико-экономическим показателям сплошные швы имеют более низкую ресурсоемкость и более высокую несущую способность одновременно. Поэтому в практике проектирования и изготовления сварных конструкций следует применять сварные швы с минимально возможным катетом и соответственно максимально возможной длины. Такой подход позволяет не только повысить несущую способность таврового соединения, но и сократить расход ресурсов, необходимых для его изготовления [8, 9].

Важным резервом в повышении эффективности сварочных работ является использование рационально выполненной подготовки кромок перед сваркой угловых швов. Ниже представлены такие конструктивные решения, разработанные с участием автора. Все три решения объединены одной идеей, которая реализована в различных типах сварных соединений [10, 11], а также при изготовлении паяных нахлесточных соединений дуговой пайкой [12].

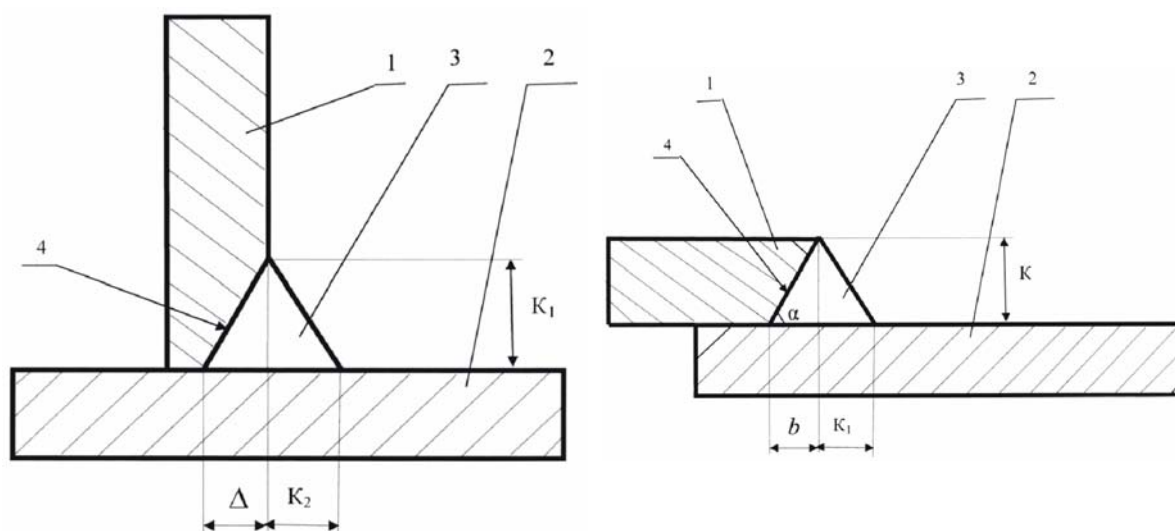


Рис. 3 – Схема таврового (а) и нахлесточного (б) сварного соединения:
1 и 2 – соединяемые детали, 3 – сварной шов, 4 – скошенная кромка

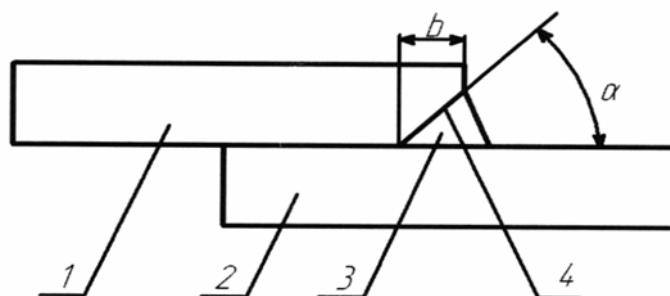


Рис. 4 – Паяное нахлесточное соединение с угловым швом:
1 и 2 – соединяемые детали, 3 – сварной шов, 4 – скошенная кромка

Для всех соединений, показанных на рисунках 3 и 4, наличие скоса кромки позволяет увеличить площадь разрушения используемых швов при одинаковых объемах наплавленного металла. Это свойство применительно к дуговой пайке позволяет снизить термическое воздействие на основной металл и тем самым обеспечить требуемую стойкость цинкового защитного покрытия. Поэтому такие паяные соединения имеют не только высокую прочность, но и обладают хорошей коррозионной стойкостью.

В работе [13] предложено использовать пайку для снижения концентрации напряжений в сварных соединениях. Схематично такое техническое решение показано на рисунке 5.

Согласно ему в местах перехода от сварного шва к основному металлу, где имеет место значительная концентрация напряжений, выполняются напайки из материала (припоя) с модулем упругости, меньшим, чем у материала сварного шва. Благодаря этому силовой поток, концентрирующийся у краев сварного шва, разветвляется. Часть его по-прежнему проходит через концентратор напряжений, а другая часть воспринимается предлагаемой напайкой. Поэтому концентрация напряжений в месте перехода от шва к основному металлу резко уменьшается.

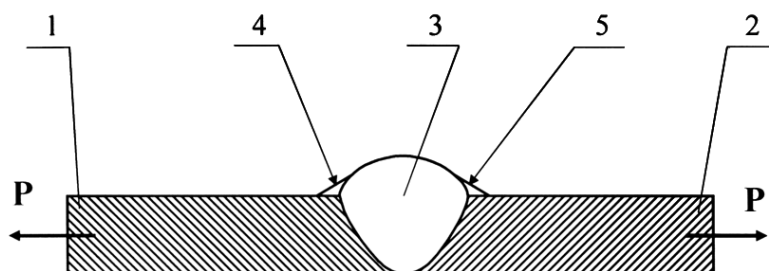


Рис. 5 – Схема гибридного паяно-сварного соединения, обеспечивающего снижение концентрации напряжений: 1 и 2 – соединяемые заготовки, 3 – стыковой сварной шов, 4, 5 – напайки из материала с более низким модулем упругости, чем у основного материала, P – приложенное усилие

Литература

1. Дилтай У. Сварка и соединение – ключевые технологии третьего тысячелетия // Автоматическая сварка.- 2008.- № 11.- С. 101 – 107.
2. Концепция развития сварочного производства Республики Беларусь на 2001 – 2015 г.г. Материалы II международного симпозиума «Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения». Минск, 28 марта 2001г.- с. 215-254.
3. Миддельдорф К., Д. фон Хофе Тенденции развития технологий соединения материалов // Автоматическая сварка.- 2008.- № 11.- С. 39 – 47.
4. Иващенко Г.А., Снежков Н.С. Уменьшение массы наплавленного металла угловых швов тавровых соединений с разделкой кромок // Сварочное производство.- 1991.- № 8.- С. 14 – 16.
5. 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.
6. Навроцкий, Д.И. Расчет сварных соединений с учетом концентрации напряжений.- Л.: Машиностроение.- 1967.- 163 с.
7. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г.А. Николаев, В.А. Винокуров. М.: Высшая школа.- 1990.- 446 с.
8. Цумарев Ю.А., Цумарев Е.Н., Сасновский С.П., Суцук С.Н. Сварное соединение. Решение о выдаче патента по заявке и № 20120243 с приоритетом от 11 марта 2012 г.
9. Цумарев Ю.А., Суцук С.Н., Цумарев Е.Н. Техничко-экономическая эффективность применения прерывистых сварных швов. Материалы международной НТК «Материалы, оборудование, и ресурсосберегающие технологии». Могилев, 19-20 апреля 2012 г. С.201.
10. Неразъемное соединение с угловым швом. Пат. РБ № 5646 (U). МПК В 23 К 33/00. Авторы: Цумарев Ю.А., Радченко А.А., Попковский В.А., Клочков В.Н., Цумарев Е.Н. Заявл. 23.02.2009, опубл. 30.10.2009 г.
11. Сварное соединение. Пат. Р.Б. № 5647 (U). МПК В 23 К 33/00. Авторы Цумарев Ю.А., Радченко А.А., Попковский В.А., Клочков В.Н., Цумарев Е.Н. Заявл. 23.02.2009, опубл. 30.10.2009 г.
12. Паяное соединение внахлестку. Пат. РБ № 5134(U). МПК В 23 К 3/00. Авторы: Павлюк С.К., Цумарев Ю.А., Лупачев А.В., Цумарев Е.Н. Заявл. 17.06.2008, опубл. 30.04.2009 г.
13. Цумарев Ю.А., Шелег В.К., Игнатова Е.В., Цумарев Е.Н., Олешкевич Д.А. Неразъемное соединение гибридного типа. Пат. РБ. № 7928 (U). МПК В 23 К 3/00. Заявл. 15.07.2011, опубл. 28.02.2012.