

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ С СОПУТСТВУЮЩЕЙ ПАЙКОЙ

В.И. САВУЛЯК, С.А. ЗАБОЛОТНЫЙ, Д.В. БАКАЛЕЦ

Винницкий нац. техн. ун-т. 231021, г. Винница, ул. Хмельницкое шоссе, 95. E-mail: vsavulyak@mail.ru

Обоснована целесообразность и описана технология получения неразъемных соединений путем объединения процессов сварки и пайки, которая использует тепло, выделяемое в процессе горения дуги. Целью работы является установление влияния сформированного паяного компонента на прочность соединения и конструкции в целом. Разработана методика изготовления опытных образцов, позволяющая установить необходимые зависимости прочности соединений от типа паяльного материала и его количества. Непосредственно испытания на прочность и обработку экспериментальных данных выполняли по рекомендациям ГОСТ 28830–90. Использование программ конечно-элементного анализа позволило определить оптимальные режимы сварки с сопутствующей пайкой и количество паяльного материала, который может быть расплавлен. Технология может быть использована для проведения ремонта рам транспортной техники, поврежденных трещинами, путем приваривания усилительных накладок. Также целесообразно использование разработанной технологии при производстве рамных конструкций. Доказано, что применение технологии получения неразъемных соединений путем объединения процессов сварки и пайки с использованием припоев на основе меди может увеличить прочность соединения на треть по сравнению с классическим сварным соединением. Библиогр. 12, табл. 3, рис. 4.

Ключевые слова: рамная конструкция, транспорт, трещина, технология, ремонт, усиление, сварка, пайка, прочность

Перспективным направлением увеличения долговечности и повышения эксплуатационных свойств сварных конструкций при ремонте и изготовлении является использование сочетания нескольких родственных процессов [1–4]. Применение таких технологий целесообразно для обеспечения повышенных требований к надежности и долговечности. Примером может служить ремонт рам средств транспорта, в частности лонжеронов, участки которых повреждены трещинами [2, 5]. Для их ремонта и усиления предложено устанавливать дополнительные элементы путем их приварки с сопутствующей пайкой. Технология предусматривает использование высокотемпературных припоев, что позволяет повысить прочность соединений и коррозионную стойкость околошовной зоны [6, 7]. Особенностью технологии есть то, что припой устанавливается между основными элементами, которые свариваются, и расплавляется за счет тепла в околошовной зоне, выделенного в процессе горения дуги [2].

Предыдущими исследованиями установлено, что использование сварки с сопутствующей пайкой позволяет увеличить ресурс конструкции по сравнению с другими известными методами ремонта [5]. Однако дополнительных исследований требует установление влияния сформированного паяного компонента на прочность соединения и конструкции в целом.

Общепринятая технология высокотемпературной пайки включает такие дополнительные опе-

рации [8] как очистка и лужение основного материала, предшествующие сборке конструкции в нужном положении с необходимым зазором. После этого основу нагревают выше температуры плавления припоя, наносят флюс и только потом вводят припой, заблаговременно покрытый флюсом. Введение припоя проводят путем касания им разогретого места в зоне соединения, в результате чего он расплавляется и затекает в зазор между деталями [9].

В технологии, предусматривающей сочетание сварки с сопутствующей пайкой, выполнение всех рекомендованных выше операций практически невозможно или затруднено. Реализация сварки с сопутствующей пайкой выполняется по другой технологии, поэтому возникает необходимость исследования прочностных характеристик паяного участка полученного соединения, что позволит прогнозировать его общую прочность.

Исследовались паяные участки, полученные с использованием медных, медно-серебряных, медно-цинковых и самофлюсующихся медно-фосфорных припоев. Предыдущий микро- и макроанализ паяного участка показал возможность получения качественных соединений [2].

Испытание на прочность и обработку экспериментальных данных выполняли по рекомендациям ГОСТ 28830-90. Перед проведением сварки с сопутствующей пайкой соединяемых деталей 1 и 2 (рис. 1, а) в местах размещения припоя 3 приваривали дополнительные элементы б, что необходимо для закрепления в машинах испытания на



разрыв. Для испытаний на срез из сварно-паяной конструкции (рис. 1, *a*) по штриховой линии 5 вырезали образец (рис. 1, *б*) и высверливали два отверстия 7.

После проведения сварки с сопутствующей пайкой образцы на разрыв (тип II) и срез (тип V) механически обрабатывались до размеров по ГОСТ 28830–90. При этом полностью удалялся сварной шов и оставалось только паяное соединение (рис. 1, *б*, *в*).

Во время выполнения паяных соединений на опытных образцах максимально возможно приближались к реальному технологическому процессу приварки накладок для усиления, то есть поверхность основы и паяльного материала механически зачищали, после чего собирали так, как показано на (рис. 1, *a*) и проводили процесс сварки. В ряде опытов между паяльным материалом и заготовкой размещали тонкий слой флюса 4 на основе борной кислоты и буры [10]. Установлено, что увеличение его количества приводит к чрезмерному порообразованию, а его отсутствие заметно снижает способность припоя смачивать стальные поверхности.

В ходе экспериментальных исследований не всегда удавалось достичь полного расплавления паяльного материала теплом, которое распространяется от сварочной ванны. Установлено, что максимальная ширина полоски, которую можно расплавить в процессе сварки, существенно зависит от мощности дуги, температуры плавления материала припоя, геометрии деталей (толщины стенок рамной конструкции и элементов усиления и т.д.), а также и от пространственного положения

электрода относительно деталей в процессе сварки (см. на рис. 1, *a*, углы α и β).

Исследование влияния вышеуказанных параметров проводили с использованием пакета прикладных программ конечно-элементного анализа. Одним из наиболее информативных способов вывода результатов моделирования являются температурные поля, значение и характер распространения которых позволяет судить о максимальном количестве паяльного материала, который может быть расплавлен в заданных условиях.

Для примера рассмотрим модель приварки накладки толщиной 5 мм к основанию толщиной 7 мм. Толщина полоски припоя (в заданной модели) при этом составляет 1 мм, мощность сварки 37 Вт / мм². Сварку проводили электродом диаметром 4 мм на постоянном токе прямой полярности под углом $\alpha = 45^\circ$. Сечение, проходящее по сварочной ванне, указывает на характер распространения температурного поля от зоны сварки (рис. 2, *a*) перпендикулярно сварному шву. Это сечение температурного поля не полностью определяет допустимую ширину полоски припоя, поскольку скорость его распространения не равна скорости сварки. Корректным является использование дополнительно построенных для этого изотерм квазистационарного температурного поля на горизонтальном сечении А-А, проходящего по оси пластинки паяльного материала (рис. 2, *б*).

Рациональную ширину полоски припоя можно определить, используя его основные теплофизические характеристики (температура плавления, теплопроводность, теплоемкость) [6]. В данном исследовании используется паяльный материал с температурами плавления 800 и 600 °С. По-

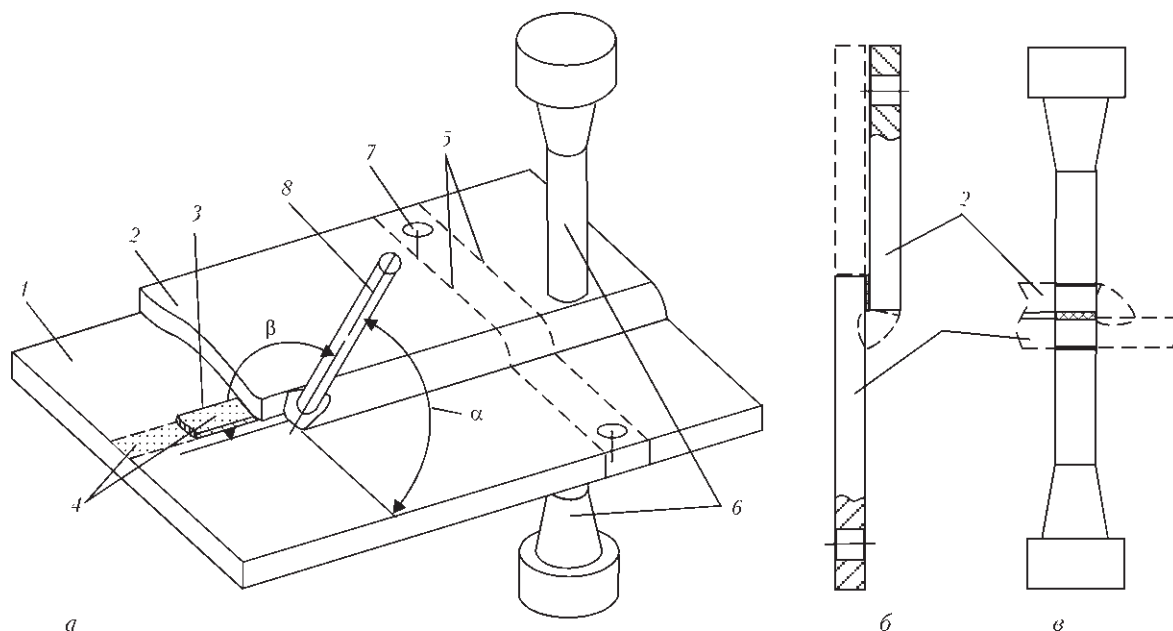


Рис. 1. Схема подготовки образцов для испытания паяного участка на разрыв и срез: *a* — сварка с сопутствующей пайкой; *б* — образец тип V; *в* — образец тип II

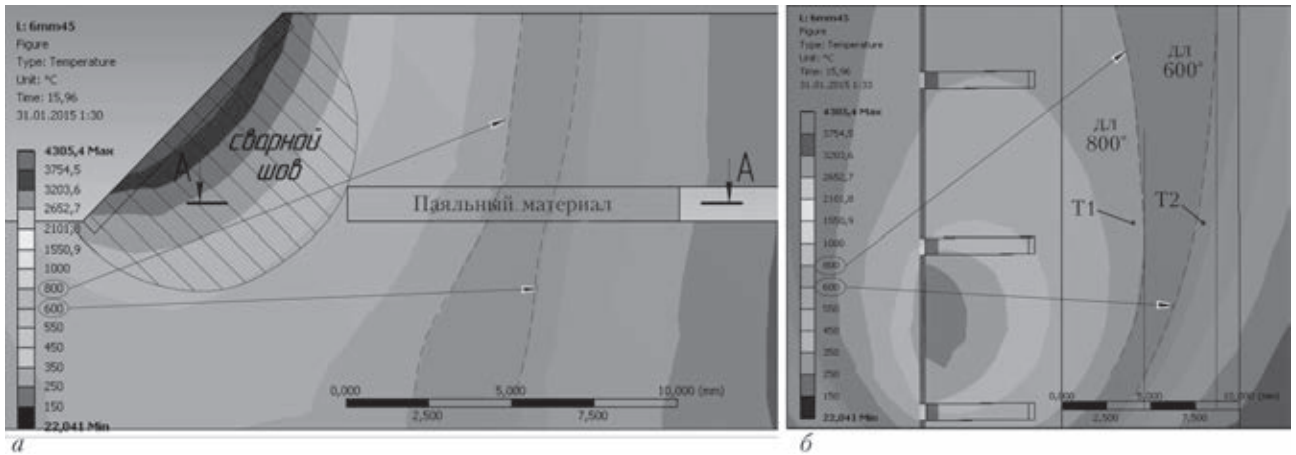


Рис. 2. Температурное поле процесса сварки с нанесенными изотермами: а — поперечное сечение; б — горизонтальное сечение А-А

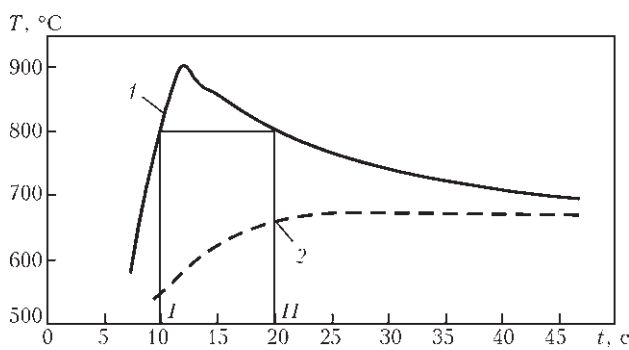


Рис. 3. Термограммы: 1 — точка T1 (800 °C); 2 — точка T2 (600 °C)

строенные касательные к изотермам температур плавления (рис. 2, б) должны быть параллельными оси пластины паяльного материала. Ширина полоски паяльного материала должна помещаться в пределах от границы сварного шва до соответствующей касательной. С учетом масштаба определяем ширину пластинок припоя. Для припоя с температурой плавления 800 °C ширина должна составлять 4,2 мм, а 600 °C — 7,6 мм в условиях соблюдения вышеуказанных параметров. Для расплавления паяльного материала, кроме необходимой температуры, нужно время, за которое к нему поступит необходимое количество теплоты. Для его определения построены термограммы нагрева

пластинки припоя в процессе сварки для наиболее удаленных относительно сварного шва точек T1, T2 (рис. 3). По построенным термограммам, кроме максимальной температуры, можно определить время пребывания паяльного материала в определенной области температур. Для припоя с температурой плавления 800 °C оно определяется из промежутка между линиями I и II (рис. 3) и составляет 10 с.

Исследование влияния пространственного положения электрода относительно деталей в процессе сварки на конфигурацию температурных полей и положение изотерм выполняли с использованием компьютерного моделирования и проверяли экспериментально. Для схемы сварки внахлест положение электрода относительно деталей определяется углом к оси шва β и углом в плоскости, перпендикулярной оси шва α (см. рис. 1, а). Изменение последнего при сварке внахлест контролируется ГОСТ 5264–80 и может колебаться в пределах 30...60°. Он частично определяет форму поперечного сечения сварного шва, объем наплавленного металла, и соответственно влияет на скорость сварки. Поэтому угол наклона электрода изменяет количество и распределение тепловой энергии по объему деталей и частично определяет количество паяльного материала, который может быть расплавлен теплом сварки.

В табл. 1 и 2 приведены данные по выбору ширины полоски припоя толщиной 1 мм в зависимости от угла наклона электрода α в процессе сварки для различных толщин стенки лонжерона рамной конструкции. Толщина накладки при этом составляет 5 мм, мощность сварки 37 Вт/мм².

Для больших толщин лонжерона рамы расчеты не выполнялись, так как ширина полоски припоя, которая может быть расплавлена, практически не меняется с дальнейшим ростом толщины его стенки.

С использованием разработанных рекомендаций получены качественные сварно-паяные со-

Таблица 1. Ширина полоски припоя с $T_{пл} = 800$ °C

Угол α , град	Толщина стенки лонжерона рамы, мм						
	5	6	7	8	9	10	12
	Ширина полоски припоя с $T_{пл} = 800$ °C, мм						
30	5,2	4,5	3,8	3,5	3,2	3	3
35	5,3	4,6	3,9	3,5	3,2	3	3
40	5,4	4,7	4,1	3,6	3,2	3	3
45	5,6	4,8	4,2	3,6	3,2	3	3
50	6	4,9	4,5	3,7	3,2	3	3
55	6,6	5,1	4,8	3,8	3,3	3,1	3
60	8,2	6,5	5,3	4	3,4	3,1	3

Таблица 2. Ширина полоски припоя с $T_{пл} = 600\text{ }^\circ\text{C}$

Угол α , град	Толщина стенки лонжерона рамы, мм						
	5	6	7	8	9	10	12
	Ширина полоски припоя с $T_{пл} = 600\text{ }^\circ\text{C}$, мм						
30	9,2	7,1	6,7	6,2	5,7	5,2	5,1
35	9,5	7,6	6,9	6,3	5,8	5,2	5,1
40	10	8,4	7,2	6,4	6	5,3	5,1
45	10,5	9	7,6	6,8	6,3	5,4	5,1
50	11	9,7	8	7,3	6,6	5,5	5,2
55	12	10,3	8,9	7,9	6	5,7	5,2
60	13	12	10	8,5	7,6	6	5,2

Таблица 3. Механические свойства паяного соединения

Механические свойства	Тип припоя			
	Медный	Медно-серебряный	Медно-цинковый	Медно-фосфорный
σ_B , МПа	293	89	230	-
τ , МПа	205	73	172	-

единения и проведены их механические испытания на растяжение и сдвиг, рассчитаны пределы прочности на разрыв и срез паяного участка шва (табл. 3).

Испытаниями установлено, что использование медно-фосфорных припоев для усиления сварных соединений нецелесообразно, поскольку увеличение прочности за счет паяного участка незначительное.

Для расчетов прочности сварно-паяного соединения и прогнозирования прочности конструкции в целом нужно учесть направление и величину нагрузок, действующих на него (рис. 4).

Распространенный вариант разрушения соединений внахлест, нагруженных силами F , происходит по линии наименьшего сечения сварного шва и паяного участка I-II, а прочность зависит от марки материалов и рабочих площадей сечения сварного шва и паяльного материала [11, 12]. Кроме того, в проектных расчетах предлагается учитывать коэффициент условий работы сварного шва (0,85...1), и коэффициент прочности припоев (0,5...0,65).

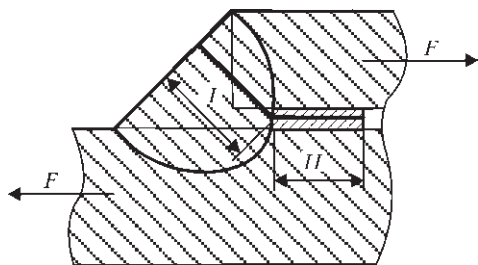


Рис. 4. Схема расчетного сечения сварно-паяного соединения внахлест

Итак, максимально допустимые усилия на сварно-паяные швы $F_{с-п.с}$ рассчитаем по формуле:

$$F_{с-п.с} = S_{св.ш} R_{ш} \gamma_c + S_{п.м} \tau k_{п.м}, \quad (1)$$

где $S_{св.ш}$ — площадь наименьшего сечения сварного шва; $R_{ш}$ — расчетное сопротивление сварного шва (принимается по пределу прочности основного материала); γ_c — коэффициент условий работы (берем максимально возможный 0,85); $S_{п.м}$ — площадь паяного участка, работающего на срез; τ — предел прочности на срез паяного участка; $k_{п.м}$ — коэффициент прочности припоев (принимается 0,5).

Площадь паяного участка определяется как произведение длины на ширину паяльного материала. Площадь самого маленького сечения сварного шва расположена под углом 45° к катетам и рассчитывается по формуле:

$$S_{св.ш} = \cos 45^\circ \cdot kl \approx 0,7kl, \quad (2)$$

где k — катет сварного шва, принимаем в соответствии с толщиной накладки; l — расчетная длина сварного шва, равная фактической минус 10 мм.

Эффективность использования технологии сварки с сопутствующей пайкой рассмотрено для случая приварки накладки толщиной 5 мм к стенке лонжерона рамы из стали 09Г2С ($R_{ш} = 500$ МПа) толщиной 7 мм и паяльного материала с температурой плавления $800\text{ }^\circ\text{C}$. В случае приварки накладки электродом с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ (ширина пластинки медно-цинкового припоя 3,8 мм) прочность соединения возрастает на 22 %, а при тех же условиях с углом наклона $\alpha = 60^\circ$ (ширина пластинки припоя 5,3 мм) увеличивается на 30 %. В случае использования для сварки с сопутствующей пайкой медного припоя прочность соединения внахлест можно увеличить на 36 % по сравнению со сваркой без пайки.

Выводы

Разработан ряд практических рекомендаций относительно использования сварки с сопутствующей пайкой для ремонта рам транспортной техники путем приваривания усилительных накладок.

Приведенная в статье методика, основанная на использовании программ конечно-элементного анализа, дает возможность определять оптимальные параметры режима сварки с сопутствующей пайкой и количество паяного материала, которое может быть расплавлено.

Для сварки с сопутствующей пайкой целесообразно использовать высокотемпературные припои на основе меди, которые позволяют увеличить прочность соединения внахлест на величину до 36 % по сравнению со сваркой без пайки.

1. *Посвідання зварювання та паяння для ремонту рам транспортних засобів* / В.І. Савуляк, С.А. Заболотний, Д.В. Бакалець // Проблеми трибології. – 2014. – № 3(73). – С. 17–21.
2. *Savulyak V.I., Zabolotny S.A., Bakalets D.V. Improvement of strengthening and repair of frame structures welding methods* // Tehnomus «New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies»Jornal / Romainia. – 2013. – № 20. – S. 189–192.
3. *Хорунов В.Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей.* – Киев: Наук. думка, 2008. – 240 с.
4. *Особливості паяння маловольфрамових твердих сплавів* / С.Ю. Мариненко, Г.М. Крамар // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014. – № 1(47). – С.196–200.
5. *Бакалець Д.В., Савуляк В.І. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин* // Зб. наук. праць Вінницького нац. аграрного ун-ту. Сер. Технічні науки. – 2012. – Вип. 11(66). – Т. 2. – С. 302–306.
6. *Петрунин И.Е., Лоцманов С.Н., Николаев Г.А. Пайка металлов.* – М.: Металлургия, 1973. – 280 с.
7. *Ляпіна О.В. Фізико-хімічні процеси на поверхні плівок мідних сплавів* : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. хім. наук / Прикарпатський нац. ун-т ім. Василя Стефаника. – Івано-Франківськ, 2006. – 20 с.
8. *Кортес А.Р. Сварка, резка, пайка металлов.* – М.: Аделант, 2007. – 192 с.
9. *Технология сварки, пайки и контроля заготовок режущего инструмента. Методические рекомендации ВНИИ* / Под ред. К.П. Имшенника. – М.: НИИМашпрома, 1976. – 432 с.
10. *Екатова А. С. Флюсы и газовые среды. Справ.* – М.: Машиностроение, 1975. – 407 с.
11. *Пособие по проектированию стальных конструкций к СНиП П-23-81 «Стальные конструкции» ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР.* – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
12. *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках.* ИЭС им. Е.О. Патона / Под ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.

Поступила в редакцию 03.03.2015

Наплавка. Технологии, материалы, оборудование / Составители: И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев, Е. Ф. Переплетчиков, Ю. М. Кусков. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2015. – 402 стр.

Сборник включает 119 статей сотрудников отдела «Физико-металлургических процессов наплавки износостойких и жаропрочных сталей» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. В этих статьях обобщен многолетний опыт сотрудников отдела в области исследований и разработки новых способов наплавки, наплавочных материалов, технологий наплавки, создании наплавочного оборудования.

Во многом результаты исследований, которые приводятся в сборнике статей, не потеряли актуальности до настоящего времени и данный сборник будет полезен научным и инженерно-техническим сотрудникам институтов и предприятий, занимающихся проблемами наплавки. Он может быть также во многом полезен студентам ВУЗов и аспирантам соответствующих специальностей.



СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ / Составители: В.М. Илюшенко, Е.П. Лукьянченко. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с.

Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 гг., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их производственного применения в различных отраслях промышленности. Сборник может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, развивающим исследования в этой области.



По вопросам реализации просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка».