

Несущая способность паяных соединений с накладками

Исследована несущая способность паяного стыкового соединения с односторонней накладкой с учетом внецентренной продольной растягивающей силы.

Ключевые слова: стыковое паяное соединение, внецентренное растяжение, накладка, напряженно-деформированное состояние.

The carrying capacity of soldered butt joint with one-sided cover plate is studied taking into account the eccentric longitudinal stretching force.

Keywords: butt soldered joint, eccentric stretching, cover plate, the deflected mode.

Пайка — часто используемый технологический процесс, который имеет ряд преимуществ при соединении цветных металлов и сплавов, разнородных материалов и заготовок различной толщины [1]. При большом разнообразии видов паяных соединений стыковое относится к наиболее распространенным и может являться конструктивным элементом в комбинации с нахлесточным соединением [1, 2]. Ввиду низкой прочности стыковых паяных соединений, особенно при низкотемпературной пайке, предлагаются конструктивные решения, направленные на повышение их несущей способности. Так, в работе [1] отмечается, что из всех представленных в ней видов пластинчатых паяных соединений наименее прочным является стыковое, прочность остальных больше из-за увеличения площади спая при сочетании нахлеста и стыка. К ним относится стыковое паяное соединение с накладкой (рис. 1). В работе [2] использование накладки считается конструктивным решением, повышающим прочность стыкового соединения, и паяное соединение с накладкой отнесено к механически усиленным. Однако при оценке работоспособности стыковых паяных соединений с накладкой в работах [1, 2] не учитывается, что односторонняя накладка нарушает симметрию соединения и изменяет характер его напряженного состояния. При этом однородное поле напряжений от продольной растягивающей нагрузки суммируется с неравномерным полем напряжений от изгибающего момента, обусловленного несовпадением линии действия продольной силы с центром тяжести суммарного сечения, включающего в себя сечение наклейки и соединяемых пластин. Таким образом, в паяном соединении с односторонней накладкой имеет место напряженное состояние внецентренного растяжения [3, 4], которое может влиять на распределение рабочих напряжений и несущую способность паяного соединения.

Цели данной работы — анализ напряженно-деформированного состояния паяного соединения с накладкой и разработка рекомендаций для оптимизации конструкции.

Рассмотрим распределение рабочих напряжений в паяном соединении с накладкой (см. рис. 1). При расчете составное сечение бруса, соединенного пайкой, при совпадении модулей упругости материалов наклейки и соединяемых деталей можно рассматривать как сплошное [4]. Для определения максимальных нормальных напряжений в данном паяном соединении суммируем растягивающие напряжения от продольной нагрузки и изгибающего момента: $\sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_{и \max}$, где σ_p — напряжение от растягивающей силы; $\sigma_{и \max}$ — максимальные напряжения от изгибающего момента.

Напряжения σ_p от растягивающей силы P в зоне наклейки отличаются от аналогичных напряжений вдали от нее (приложенных напряжений σ) ввиду разной высоты, а следовательно, и разных площадей соответствующих поперечных сечений.

Тогда справедливы выражения: $\sigma = \frac{P}{ba}$ или $P = ba\sigma$;

$\sigma_p = \frac{P}{b(a+c)}$, где a и c — конструктивные размеры заданного соединения (см. рис. 1); b — ширина наклейки, равная ширине соединяемых пластин.

Смещение линии действия продольной силы P относительно центра тяжести составного сечения определится формулой $e = c/2$.

Выразим напряжения σ_p и $\sigma_{и \max}$ через приложенные напряжения σ , просуммировав их, получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \sigma_p + \sigma_{и \max} = \frac{\sigma}{1+\eta} + \frac{3\sigma\eta}{(1+\eta)^2} = \\ &= \sigma \left[\frac{1}{1+\eta} + \frac{3\eta}{(1+\eta)^2} \right] = \psi\sigma, \end{aligned}$$

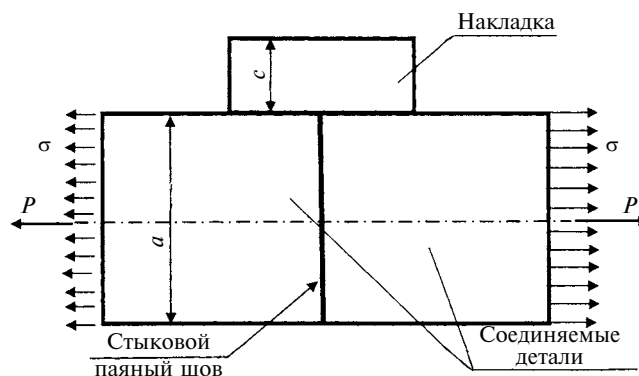


Рис. 1. Схема стыкового паяного соединения с накладкой

где $\eta = c/a$ — относительная толщина накладки; ψ — коэффициент, показывающий во сколько раз максимальные суммарные напряжения превышают приложенные напряжения σ :

$$\psi = \left[\frac{1}{1+\eta} + \frac{3\eta}{(1+\eta)^2} \right] = \frac{1+4\eta}{(1+\eta)^2}. \quad (1)$$

Таким образом, напряженное состояние паяного соединения с накладкой можно оценивать безразмерным параметром ψ , который зависит только от относительной толщины η накладки. Чтобы оценить влияние внецентренного приложения рабочей нагрузки, рассчитаем параметр ψ при разной относительной толщине η накладки:

η	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	1,00	1,50
ψ	1	1,09	1,16	1,21	1,25	1,30	1,33	1,25	1,12

Анализ полученных данных показал, что накладка в паяном стыковом соединении не только не снижает нормальные напряжения в шве, а даже их увеличивает. Это повышение может составлять до 33 %.

Исследуем функцию (1) на максимум по первой производной, приравняв ее нулю:

$$\frac{d\psi}{d\eta} = \frac{4(1+\eta)^2 - 2(1+4\eta)(1+\eta)}{(1+\eta)^4} = 0. \quad (2)$$

Из выражения (2) получим: $4(1+\eta) - 2(1+4\eta) = 0$; $\eta = 0,5$.

Таким образом, максимальное рабочее напряжение имеет место при $\eta = 0,5$ и характеризуется коэффициентом $\psi = 1,33$, т. е. односторонняя накладка не упрочняет паяное стыковое соединение и ухудшает несущую способность конструкции.

Для получения наглядной картины распределения рабочих напряжений в паяном соединении с накладкой исследовали напряженное состояние методом конечных элементов, используя программу Cosmos. Рассчитывали напряженно-деформи-

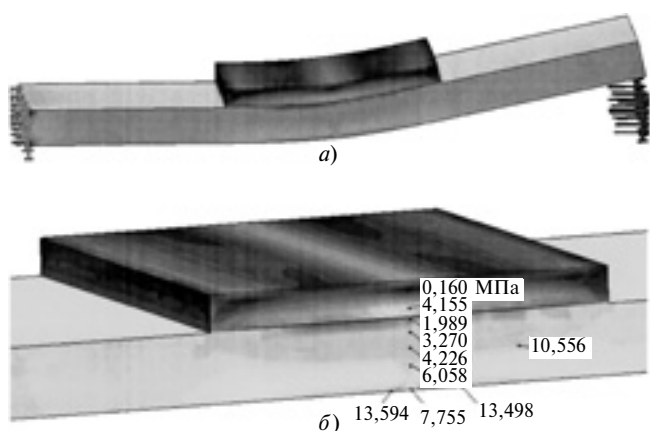


Рис. 2. Деформация паяного стыкового соединения с накладкой (а) и распределение напряжений в нем (б)

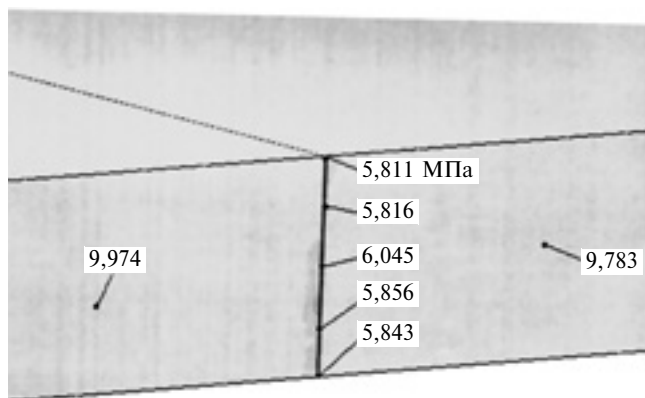


Рис. 3. Распределение напряжений в стыковом соединении без накладки

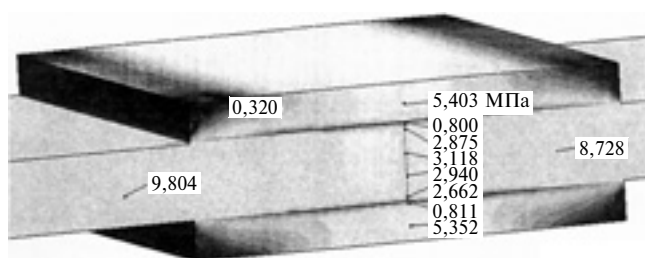


Рис. 4. Распределение напряжений в стыковом паяном соединении с двумя симметричными накладками

рованное состояние (НДС) в паяном соединении стальных пластин толщиной $a = 6$ мм, шириной $b = 40$ мм при толщине накладки $c = 3$ мм. Анализ полученного распределения напряжений показал, что стыковой паяный шов имеет объемное напряженное состояние [5] (рис. 2, а). Полученные результаты полностью подтвердили предположение о негативном влиянии накладки. И накладка, и паяный шов практически свободны от напряжений и не испытывают значительных нагрузок. При этом отчетливо видна деформация соединения, характерная для изгиба (см. рис. 2, а). Интенсивность напряжений в накладке изменяется от 0,16 до 4,15 МПа (рис. 2, б), тогда как приложенные напряжения составляют 10 МПа. При этом в паяном шве на стороне, свободной от накладки, они достигают 7,8 МПа, а в аналогичном соединении без накладки напряжения в паяном шве составили 5,9 МПа (рис. 3), т. е. в 1,3 раза меньше.

Для получения обоснованных рекомендаций по упрочнению паяных соединений стыкового вида провели расчеты симметричного соединения с двумя накладками (рис. 4), которые показали, что симметричное расположение накладок полностью устранило изгиб и частично разгрузило стыковой паяный шов. Напряжения в стыковом паяном шве при установке двух накладок снизились до 3,16 МПа, т. е. по сравнению с соединением с односторонней накладкой это соединение прочнее в 2,47 раза.

Расчетами установлено, что размеры накладок влияют на прочность стыковых паяных швов. Изменяя толщину накладки, можно получить требуемую прочность соединения и обеспечить его равнопрочность.

Исследования показали, что распределение напряжений в месте установки накладок достаточно равномерное, следовательно, величина разгрузки центральной части соединения будет пропорциональна его толщине вместе с накладками. Таким образом, при использовании в стыковом паяном соединении симметричных накладок, толщина которых равна толщине основного металла, можно ожидать трехкратного снижения напряжений.

Как показал анализ, напряжения в накладке при любой ее толщине всегда меньше приложенных напряжений. Поэтому накладки можно изготавливать из менее прочного материала, чем основной металл. В противном случае накладки будут недогруженными по сравнению с основным металлом. Причем при увеличении толщины накладок недогруженность возрастает.

В работе [6] показано паяное соединение с накладкой, где торцы соединяемых пластин находятся на расстоянии друг от друга и стыковой шов как таковой отсутствует (рис. 5). Исследования показали, что изгиб значительно влияет на распределение напряжений, которое в этом соединении более неравномерное, чем в стыковом соединении с одно-сторонней накладкой.

Сравнением расчетных схем (см. рис. 5 и 1) было установлено, что в первом случае на участке ме-

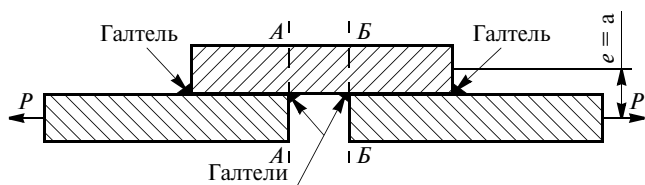


Рис. 5. Схема паяного соединения с односторонней накладкой без стыкового шва

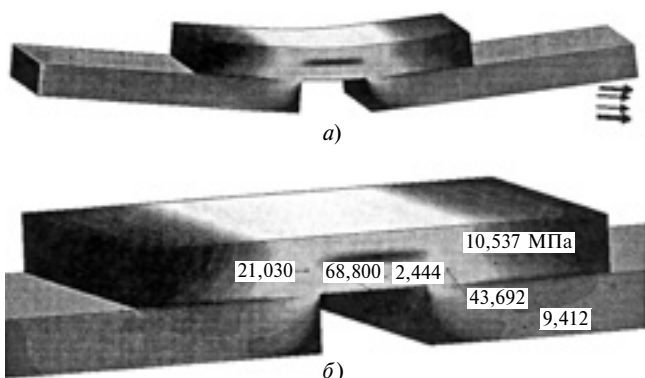


Рис. 6. Деформация (а) и распределение напряжений (б) в паяном соединении с односторонней накладкой без стыкового шва



Рис. 7. Распределение рабочих напряжений в паяном соединении со вставкой

жду торцами паяных пластин (А—А и Б—Б) изгибается только накладка, следовательно, момент сопротивления изгибу будет меньше в 2÷4 раза, чем в схеме, приведенной на рис. 1, где изгибающий момент больше из-за смещения оси продольной нагрузки относительно центра тяжести в изгибаемом сечении (размер e). Если в первом случае смещение равно половине толщины накладки (при наибольших изгибных напряжениях соответственно $a/4$), то во втором случае смещение равно толщине пластин. Таким образом, изгибные напряжения в паяных соединениях с накладкой без стыкового шва в несколько раз больше напряжений в соединении со стыковым швом. При этом максимальные растягивающие изгибные напряжения будут в зоне перехода галтелей к основному металлу.

На рис. 6, а показаны деформация и распределение напряжений в паяном соединении без стыкового шва. С использованием программного комплекса Cosmos выполнили расчет при $\sigma = 10$ МПа (рис. 6, б). Полученные результаты подтвердили предположение о значительных напряжениях в паяном соединении без стыкового шва. Максимальные напряжения (68,8 МПа) испытывала накладка, что в 6,88 раза больше приложенных напряжений. Поэтому стыковой шов в паяном соединении с накладкой нельзя компенсировать увеличением длины нахлесточных швов. Если между торцами соединяемых пластин образовался зазор, который препятствует выполнению паяного шва, то его следует заполнить специальной вставкой, припаяв, что было подтверждено расчетами (рис. 7). Использование вставки с двумя стыковыми паяными швами значительно снизило максимальные напряжения до 12,3 МПа, т. е. в 5,5 раза.

Таким образом, установлено, что односторонняя накладка, используемая в стыковом паяном соединении, снижает его прочность ввиду внецентренного нагружения продольной силой. Для повышения прочности паяного стыкового соединения необходимо устанавливать симметричные накладки. Изменяя размеры накладок можно добиться одинако-