

М 261782

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КИСЕЛЕВ Иван Иванович

ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ
И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - член-корреспондент АН СССР,
профессор НИКОЛАЕВ Г.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. ФРОЛОВ В.П.
к.т.н., доцент ВЕРШИНСКИЙ А.В.

Ведущее предприятие - ЦНИИПроектстальконструкция.

Автореферат разослан " " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 г.
на заседании Совета _____

Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища им. Н.Э.Баумана по адресу: Москва,
107005, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х экз., заверенные печатью, просьба выслать
по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

M261782

Зах. 1095 . Тпр. 12

ВТУ.

Ней стр. 9-12. Мил

ВВЕДЕНИЕ

Пайка, как один из процессов получения неразъемных соединений, нашла широкое применение в народном хозяйстве. Она применяется в приборостроении и машиностроении, радиоэлектронике, для соединения металлов с керамикой, графитом и т.д. Одной из положительных сторон пайки является возможность применения механизации и автоматизации технологических процессов, что значительно повышает производительность труда и снижает себестоимость изделий.

В последние годы ведутся работы по изучению возможности применения пайки для создания металлоконструкций. Одной из первых работ в этой области явились научные исследования, проведенные в ИВТУ им. Баумана совместно с Главэнергостроймеханизация. Была показана возможность замены сварки пайкой при изготовлении опор и трассов линий электропередач.

В настоящее время на кафедре "Машины и автоматизация сварочных процессов" ИВТУ им. Баумана проводятся научно-исследовательские работы по дальнейшему изучению работоспособности паяных соединений металлоконструкций. Одним из основных показателей несущей способности соединения является его работоспособность при переменных нагрузках.

Была поставлена задача изучения выносливости паяных соединений встык и внахлестку. Исследования проводились на паяных соединениях из низкоуглеродистой стали Ст.3сп и низколегированных сталей 10ХСНД и 30ХГСА.

Целью настоящей работы было:

1. Рассмотрение концентрации напряжений в паяных соединениях встык и внахлестку.
2. Исследование выносливости соединений встык с учетом толщины паяной мягкой прослойки.
3. Определение пределов выносливости паяных соединений внахлестку и сопоставление их со сварными соединениями.
4. Исследование влияния технологических параметров на выносливость соединений внахлестку.
5. Определение эффективных коэффициентов концентрации для различных типов паяных соединений, для их использования при опытно-проектировании и при разработке нормативов расчета прочности паяных соединений.

Указанные задачи являлись основными. Параллельно с их решением в работе изучалось влияние дефектов на прочность и выносливость паяных соединений, а также сопоставление полей остаточных

напряжений при пайке и сварке.

Методы исследования, примененные автором диссертации, были следующие. В теоретической части был сделан анализ коэффициентов концентрации напряжений в соединениях внахлестку в зависимости от длины нахлестки и толщины соединяемых элементов. Экспериментальная часть состояла в определении опытным путем пределов выносливости паяных соединений в функции рода материала, толщины, способа подготовки образцов. Испытания проводились при переменных нагрузках при $N_{daz} = 2 \cdot 10^6$ циклов.

Научная новизна заключается в определении влияния геометрических параметров соединяемых элементов на коэффициенты концентрации напряжений. Проводился большой комплекс исследований при варьировании разнообразных параметров с одновременным сопоставлением выносливости паяных и сварных соединений.

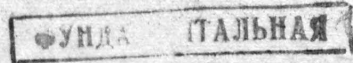
Практическая ценность выполненной работы заключается в разработке таблицы эффективных коэффициентов концентрации напряжений, приведенных для различных типов сталей и вида паяных соединений, для их использования при проектировании паяных металлоконструкций. Предлагается расчетная формула для определения коэффициента снижения допускаемых напряжений при переменных нагрузках по сравнению со статическими, при расчете паяных металлоконструкций. Дано сопоставление выносливости паяных и сварных соединений.

Содержание диссертации докладывалось в институте электросварки имени Е.О.Патона, а окончательная апробация законченной работы состоялась на заседании кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана 29 декабря 1973 г. с решением рекомендовать диссертацию к защите.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и изложена на 94 страницах машинописного текста, текст иллюстрирован 56 рисунками, библиография содержит 79 наименований, имеет 34 приложения.

Глава I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЙКИ

В разделе "Процессы смачивания и затекания припоя" дан анализ литературных данных по вопросам смачивания и затекания припоя. Рассмотрены вопросы взаимодействия паяемых элементов, флюсов и припоев. Показано, что для получения качественного паяного соединения припоем при пайке должны обладать хорошей смачивающей способностью, должны тесно соприкасаться со всеми участками поверхности, заполнять мелкие неровности, а площадь соприкосновения жидкого припоя с соединяемыми поверхностями - быть максимальной. Показана



связь между поверхностными энергиями, участвующими в процессах перемещения припоев на поверхностях твердых тел. В практике рекомендовано для оценки способности припоев к растеканию и затеканию в зазоры пользоваться технологическими пробами. Оценка качества смачивания при этом производится по величине краевого угла смачивания.

В разделе "Процессы диффузии при пайке" рассмотрены вопросы диффузии элементов из паяемого металла в припой и наоборот. Показано, что перенос вещества при пайке из паяемого металла в припой и наоборот регулируется главным образом термодинамическими условиями, определяющими переход в более равновесное состояние. В твердых металлах диффузия может происходить по поверхности, по границам зерен и в объеме отдельных зерен. При пайке химический состав, микроструктура и твердость слоев металла, смежных с соединением, в значительной мере изменяются.

Глава II. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ

Рассмотрен комплекс выполняемых операций, основными из которых являются: подготовка поверхностей соединяемых деталей, сборка, пайка и обработка деталей после пайки. Выбран оптимальный вариант подготовки поверхностей элементов металлоконструкций под пайку.

Важнейшие параметры процесса пайки — минимальная и максимальная температуры пайки, рабочая температура пайки, длительность выдержки при температуре пайки. Метод нагрева (пайки) для каждого конкретного изделия выбирается с учетом материала, припоя и наличия необходимого оборудования. Анализ существующих методов пайки показал, что наиболее пригодными для пайки узлов и соединений металлоконструкций являются:

- для пайки в заводских условиях — пайка в термических печах и пайка Т.В.Ч.;
- для пайки в условиях монтажа — пайка газовой и дуговой горелками и пайка сопротивлением.

Нами для изготовления образцов применены пайка токами высокой частоты и пайка газовой горелкой.

Глава III. ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

При пайке, как и при сварке, образуются остаточные деформации и напряжения. Возникновение сварочных деформаций и напряжений связано с неравномерным нагревом металла и остыванием. Пайка элементов, обладающих одинаковыми физико-механическими свойствами, являясь, с позиции образования остаточных напряжений, на-

более благоприятной. Эксперименты, проведенные на кафедре сварки МВТУ по изучению распределения температур по поперечному сечению элемента для случая наложения шва дуговой сваркой и паяного шва газовой горелкой на кромку пластины из стали ст.10, показали, что распределения температур при наплавке и напайке отличались между собой в количественном отношении, однако качественная картина распределения оставалась более или менее одинаковой.

Изучение остаточных напряжений на образцах показало, что при наварке и напайке на кромку и по оси пластины они незначительно отличаются друг от друга.

При пайке в печи изделие разогревалось и охлаждалось более равномерно. Остаточные деформации при этом были совершенно незначительными.

Для уменьшения остаточных деформаций паяных конструкций следует рекомендовать следующие пути: а) применять припой, возможно более близкий по своим физическим свойствам к паяемому металлу; б) применять способы пайки с равномерным нагревом и остыванием.

Глава Iу. ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Приведены основные виды паяных соединений. Даны расчетные зависимости для соединений встык, внахлестку и втавр. Рассмотрена концентрация напряжений в паяных соединениях встык и внахлестку.

Особенностью паяных соединений встык является наличие мягкой прослойки по сравнению с более жестким основным металлом. Работа мягкой прослойки паяных соединений отличается от сварных по нескольким параметрам. Во-первых, толщина паяной прослойки во много раз меньше толщины мягкой прослойки сварных швов. Во-вторых, модуль упругости основного металла и мягкой прослойки при пайке различны, при сварке они одинаковы.

Задача о распределении напряжений в мягкой прослойке была решена Качановым Л.М. и Бакин О.А. Исследования Бакина О.А. применительно к сварным соединениям показали, что несмотря на пониженное значение предела текучести прослойки по сравнению с основным металлом, соединения подобного рода работают удовлетворительно. При работе прослойки в пределах пластических деформаций образуется сложно-напряженное состояние. Это сопровождается повышением предела текучести и прочности прослойки.

Исследования, проведенные Николаевым Г.А. и Киселевым А.И.

применительно к паяным соединениям с мягкой прослойкой, показали, что при работе прослойки и в пределах упругих деформаций возникают трехосные напряжения, что является следствием различной величины поперечной деформации в основном металле и прослойке. Было показано, что при различных соотношениях между модулями упругости основного металла и прослойки образование пластичности исключается. Соединения разламываются либо хрупко в зоне паяного шва, либо в зоне основного металла вдали от паяного шва. Экспериментальные исследования подтвердили теоретические предположения.

Паяные соединения внахлестку являются наиболее целесообразными типами соединений для изготовления паяных металлоконструкций. Всегда можно подобрать длину нахлестки, обеспечивающей равнопрочность паяного соединения основному металлу. Распределение касательных напряжений в паяном соединении внахлестку в направлении действия сил происходит неравномерно и в значительной степени аналогично условиям работы сварных фланговых швов (рис. 1). Отличительной особенностью работы паяных соединений внахлестку является то, что по ширине спая усилия распределяются равномерно.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений в паяном шве

$$K_T = \frac{\tau_{\max}}{\tau_0} = \frac{\Delta l}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \Delta l}{\operatorname{sh} \Delta l} \right) \quad (1)$$

где

$$\Delta l = 2 \sqrt{\frac{2 G_{\text{сп}} \delta}{E \cdot s_0}} \quad (2)$$

$G_{\text{сп}}$ — модуль упругости паяного шва при сдвиге;

E — модуль упругости основного металла при растяжении;

s_0 — толщина паяного шва;

l — длина нахлестки;

δ — толщина паяемых элементов.

Значение коэффициентов концентрации K_T тем меньше, чем меньше величина отношения $G_{\text{сп}}/E$. Выравнивание касательных напряжений вдоль спая и уменьшение коэффициентов концентрации возможно лишь при значительных пластических деформациях.

Снижение коэффициентов концентрации напряжений и выравнивание усилий по длине нахлестки является свойством паяных швов. Экспериментальные исследования показали, что при нагружении паяного соединения внахлестку в крайних точках шва имели место значи-

тельные по величине касательные напряжения, в средних они уменьшались. С увеличением нагрузки происходило постепенное выравнивание напряжений. Возможно, что в момент разрушения соединения распределение напряжений в спаях происходит достаточно равномерно.

Паяные соединения, как и сварные точечные соединения, имеют эксцентриситеты, которые вызывают образование дополнительных изгибающих моментов (рис. 2). Каждый элемент соединения внехлестку деформируется согласно дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 y}{dx^2} E J - P y = 0 \quad (3)$$

Решение данного уравнения дает следующее выражение для величины напряжений от изгиба

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \sigma_0}{1 + \frac{L_n}{\delta} \sqrt{\frac{3 \sigma_0}{E}}} \quad (4)$$

где σ_0 — напряжение в элементах от растягивающих усилий;
 L_n — величина нахлестки;
 δ — толщина элементов.

Из данного выражения видно, что величина изгибающего напряжения зависит от длины нахлестки и толщины соединяемых элементов. Теоретический коэффициент концентрации при изгибе

$$K_T = \frac{\sigma_0 + \sigma_{изг}}{\sigma_0} \quad (5)$$

На рис. 2 показана зависимость коэффициента K_T от величины нахлестки для разных соотношений $\frac{\sigma_0}{E}$. Длина нахлестки давалась в функции от толщины элементов $L_n = K \cdot \delta$.

Видно, что с увеличением нахлестки ($\delta = const$) коэффициент концентрации уменьшается.

Таким образом, концентрация напряжений в паяном соединении внехлестку определяется двумя основными факторами:

1. Концентрация напряжений, вызванная неравномерным распределением касательных напряжений вдоль спая;
2. Концентрация напряжений, вызванная изгибом элементов соединения.

Прочность паяного соединения внехлестку зависит от длины нахлестки. Автором были определены длины нахлесток, обеспечивающие равнопрочность паяного соединения основному металлу при статических нагрузках для различных сталей. Были изготовлены

ных элементов с $\delta = 5$ мм до $\delta = 9$ мм, характеристика цикла $\chi = 0,1$.

4. При рациональной механической обработке в зоне скоса кромок по длине нахлестки пределы выносливости образцов из низкоуглеродистой стали ст.3сп, низколегированных сталей 10ХСНД и 30ХГСА повышались.

5. Сравнительные испытания паяных нахлесточных соединений и сварных с двумя лобовыми швами (сваренных ручной дуговой сваркой) сталь 3 сп $\delta = 5$ мм и $\delta = 9$ мм (электроды УОНИ 13/55, сварка в "лодочку"), стали 30ХГСА (электроды УОНИ 13/55 тип 0А) показали, что разрушающие напряжения и пределы выносливости при пайке выше, чем при сварке в среднем на 10-15%.

6. Разрушающие напряжения и пределы выносливости паяных нахлесточных соединений в значительной мере зависят от качества пайки. Паяные соединения без галтели показали пониженную несущую способность на 25-30% по сравнению с паяными соединениями с галтелями.

7. Во всех испытаниях разрушения образцов имели место в зоне концентраторов, в месте (зоне) перехода.

8. На основе исследований установлены эффективные коэффициенты концентрации в паяных стыковых и различного типа нахлесточных соединениях при разных конструктивных оформлениях и технологических обработках.

9. Приведена в первом приближении формула расчета коэффициента снижения допускаемых напряжений при переменных нагрузках по сравнению со статическими, рекомендуемая при расчете паяных соединений металлоконструкций.

10. Приведенные соотношения могут быть рекомендованы при опытно-проектировании и строительстве паяных металлоконструкций из тонкостенных элементов.

Литература, опубликованная по теме диссертации:

1. Киселев И.И. Прочность паяных соединений при переменных нагрузках. Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций. Сб. трудов МВТУ № 182 под редакцией Винокурова В.А. М., 1974.

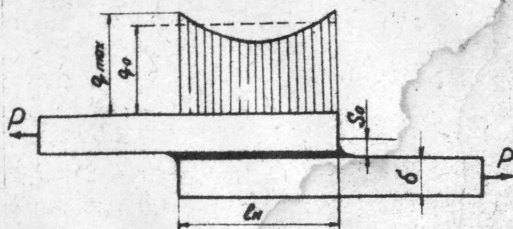


Рис. 1. Паяное соединение внахлестку, нагруженное осевыми силами.



$$\sigma_{\text{н}} = \frac{3\sigma_0}{1 + \frac{4}{3} \sqrt{\frac{3\sigma_0}{E}}}$$

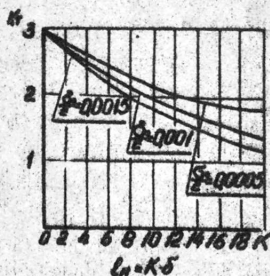
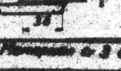
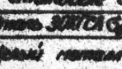
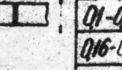


Рис. 2. Напряжения в паяном соединении внахлестку, вызванные изгибом элемента.

Таблица эффективных коэффициентов концентрации напряжений

Тип соединения	γ	σ_3	K_{σ}
1	2	3	4
Материалы $\sigma = 3$ $\delta = 5$ мм			
	0,1	58	38
	0,1	61	36
	0,1	62	35,5
	0,1	59	37,3
	0,1	67	32,8
Материалы $\sigma = 3$ $\delta = 8$ мм			
	0,1	45	4,9
	0,1	48	4,5
	0,1	38	5,7
	0,1	47	4,7
	0,1	42	5,2
	0,1	35	4,0
	0,1	40	5,5
	0,1	56	3,9
	0,1	62	3,6

Материалы $\sigma = 300$ МПа $\delta = 3$ мм			
	0,1	2,5	32,3
	0,1	11	2,5
	0,1	10	2,75
	0,1	14	1,98
Материалы $\sigma = 100$ МПа $\delta = 8$ мм			
	0,5	12,4	3,4
	0,5	12	3,4
	0,5	2,5	4,9
	0,5	10,4	4,1
	0,5	9,7	4,3
	0,5	14,5	2,9
Стальные соединения			
Сталь 30ХСНГ-67 $\gamma_{\text{нп}} = 3$ мм			
Цельный металл	0,1	27,5	—
	0,1	21,1	1,3
Сталь 3			
	S_0		
	0	-1	19
	0,035-0,05	-1	15,4
	0,1-0,14	-1	14,4
	0,16-0,19	-1	13,4
	0,2-0,25	-1	12,8