

М 255566

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

ПРОХОРОВ Николай Николаевич

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АМг-6
ТОЛЩИНОЙ ДО 30 мм С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ
ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ

(05.04.05 - Технологии и машины сварочного производства)

Аннотация
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель -
кандидат технических наук, доцент Макаров И.И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Кудрявцев И.В.,
кандидат технических наук, доцент Вершинский А.В.

Ведущее предприятие - ЦНИИПроектстальконструкция.

Автореферат разослан " "

1975 г.

1975 г.

Красного
Н.Э.Баумана
, дом 5.

печать,

теке Уч-

М 25 5566

Вопросам прочности сварных соединений с технологическими отклонениями уделяется большое внимание в СССР (МВТУ им. Баумана, ИЭС им. Патона, НИАТ и др.) и за рубежом. Однако единого подхода к оценке влияния отклонений (дефектов) на служебные характеристики соединений нет; проблема не только не утратила актуальности, но и привлекает все большее внимание. Наиболее интенсивно исследуется влияние неоднородностей швов на прочность сварных соединений легких металлов, работающих в сложных условиях.

Одной из особенностей ряда соединений этих металлов и их сплавов, например АМг-6, является повышенная чувствительность к концентрации напряжений от дефектов-концентраторов, причем не только при переменных, но и при статических нагрузках.

Целью работы является установление качественной и количественной связи между концентрацией напряжений, вызываемой геометрическими неоднородностями швов, выполненных на сплаве АМг-6, и их прочностными характеристиками при учете: масштабного фактора, низкотемпературного фактора, конструктивного фактора (вида напряженного состояния).

В условиях нормальной ($+20^{\circ}\text{C}$) и криогенной (-196°C) температур исследовали влияние пористости, несплавлений типа окисных плен и непровара центра шва, смещения кромок при статических и усталостных (вибрационных) нагрузках. Связь концентрации напряжений от формы стыкового шва с прочностью исследовали при температурах $+20$ и -196°C на соединениях толщиной 4, 10 и 30 мм. Влияние масштабного фактора исследовали на бездефектных соединениях, соединениях со смещением кромок и соединениях с порами. Конструктивная прочность соединений исследовалась ($T_{\text{исп}} = +20^{\circ}\text{C}$) при статических и вибрационных нагрузках на моделях конструкций (сварные шар-баллоны) со швами, выполненными качественно и содержащими цепочки пор.

Диссертация состоит из 4 глав и общих выводов.

Глава I. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Ввиду ряда особенностей сварки, обусловленных специфическими свойствами алюминия, в сварных швах алюминиевых сплавов не удастся избежать технологических отклонений. Наиболее часто встречающиеся из них: поры, неполное проплавление, окисные включения, смещение кромок. Установлено, что с ростом толщины свариваемых стык листов АМг-6 (многослойная сварка) преобладающими технологическими отклонениями (дефектами) швов становятся окисные пленки и включения, плохо выявляемые неразрушающими методами контроля, а также смещение кромок.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1055566

Анализ экспериментальных данных позволяет констатировать, что в качественных соединениях деформируемых сплавов статическая прочность полуфабриката в состоянии перед сваркой реализуется с учетом оптимальной технологии сварки на 85-95%. Усиление шва практически не повышает прочности соединений сплава АМг-6, что свидетельствует о чувствительности соединений этого сплава к концентрации напряжений. Низкотемпературный эффект упрочнения в сварных соединениях деформируемых алюминиевых сплавов проявляется в значительно меньшей степени, чем в основном металле, и в интервале температур 298-4,2°K не превышает 20-25%.

При переменных нагрузках сварные соединения всех алюминиевых сплавов обнаруживают повышенную чувствительность к концентрации напряжений. Так, например, только за счет снятия усиления и проплава можно добиться повышения предела выносливости соединений в 1,5-2,3 раза (сплавы системы $Al-Mg$). При снятом усилении предел выносливости соединений $Al-Mg$ -сплавов практически не зависит от технологии сварки, присадочного материала и толщины свариваемых листов (в диапазоне толщин 4,8-12,7 мм). Разупрочняющее действие термического цикла сварки сказывается лишь на усталостной прочности соединений термоупрочняемой группы сплавов. Сведения об усталостной прочности соединений деформируемых алюминиевых сплавов при криогенных температурах очень ограничены.

Экспериментальные исследования статической прочности (+20°С) соединений сплавов Д16Т, $AlMg5$, $NP5/6$, АМг-6 с непроваром корня и в центре шва свидетельствуют о повышенной чувствительности к дефектам сварки. Усиление шва не компенсирует снижения прочности за счет непровара корня. Чрезвычайно опасен корневой непровар в соединениях, работающих на усталостные (вибрационные) нагрузки: непровар, ослабляющий сечение шва на 10%, вызывает почти двукратное снижение предела выносливости соединений (Д16Т, АМг-6); при увеличении глубины непровара до 50% предел выносливости снижается в десять раз. Непровар в центре несколько менее опасен и в ряде случаев может быть скомпенсирован усилением (соединения $NP5/6$ толщиной 6,4 и 12,7 мм).

Анализ результатов испытания соединений с порами свидетельствует о том, что оценка пористости по общей площади или протяженности дефекта без конкретного учета величины и взаимного расположения пор неправомерна. Более существенным фактором, определяющим статическую и усталостную прочность соединений, является вызываемая порами концентрация напряжений.

Вольфрамовые включения, классифицируемые обычно по аналогии с



порыми, в случае, если они не сопровождаются другими дефектами, способны передавать нагрузку, не снижая прочностных показателей соединений. Этот вывод получен при статических и вибрационных испытаниях ($T_{\text{исп}} = +20^{\circ}\text{C}$) соединений сплава MP8-0 системы Al-Mg-Mn .

Статическая прочность стыковых соединений со смещением кромок исследовалась на сплавах 2014-T6 (аналог отечественного сплава Д16), AlMg5 , АМг-6 толщиной до 10 мм. Заметное снижение прочности при $+20^{\circ}\text{C}$ наблюдается, начиная с величины относительного смещения 10-15%. Влияние толщины на прочность соединений АМг-6 начинает сказываться при смещении кромок 30% и более, при этом относительная прочность $\sigma_{\text{см}} / \sigma_{\text{без см.}}$ соединений толщиной 10 мм на 15-20% ниже аналогичной характеристики соединений толщиной 4 мм. Данные по усталостной прочности соединений со смещением представлены теоретическими и экспериментальными (АМг-6; $\delta = 10$ мм) исследованиями. Наличие даже небольшого (до 15%) смещения в соединениях АМг-6 приводит к снижению выносливости в 1,5 раза, причем, влияние толщины материала на величину предела выносливости сказывается на всем исследованном диапазоне смещения (до 70%).

Сведения по статической прочности соединений алюминиевых сплавов с окисными включениями очень ограничены. Результаты испытаний на растяжение при $+20^{\circ}\text{C}$ сварных образцов из АМг-6 позволили сделать заключение о практической недопустимости окисных включений, выходящих на поверхность, т.е. имеющих характер наплавления в корне шва. Данные по усталостной прочности соединений с окисными включениями отсутствуют.

Конструктивная прочность соединений алюминиевых сплавов исследовалась при испытаниях натуральных образцов (типа цилиндрического резервуара) внутренним и внешним давлением, а также при испытаниях гидростатическим выпучиванием. Снижение температуры существенно не влияет на прочность соединений при двухосном растяжении. Конструктивная выносливость сварных соединений в значительной мере зависит от схемы нагружения: при переходе с одноосного на двухосное напряженное состояние с соотношением компонентов напряжений $\sigma_2 / \sigma_1 = 0,5$ предел выносливости снижается в 1,5 раза.

Конструктивная прочность соединений с технологическими отклонениями систематически не изучалась. Известные по литературе данные имеют фрагментарный характер и не позволяют сделать каких-либо существенных обобщений.

Рассмотренные результаты позволяют сделать лишь частные выводы о критических размерах дефектов и, как правило, без анализа напряженного состояния в опасных зонах. Экспериментальные исследова-

ния проводились на материале малой и средней (до 10–12 мм) толщин, при этом вопрос о влиянии масштабного фактора специально не ставился. Недостаточно изучена пористость и некоторые дефекты, характерные для толстолистовых соединений алюминиевых сплавов. Информация о механических свойствах соединений алюминиевых сплавов, в частности АМг–6, с технологическими отклонениями при низких температурах почти полностью отсутствует.

Глава 2. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТЫКОВОГО ШВА

Основным затруднением при решении проблемы прочности сварных соединений с технологическими отклонениями является бесконечное многообразие форм и расположения технологических отклонений–дефектов в сечении шва. Одним из возможных путей к решению этой проблемы является подход с позиций концентрации напряжений, когда геометрические неоднородности шва рассматриваются как естественные концентраторы напряжений.

При таком подходе форма стыкового шва может быть оценена коэффициентом концентрации, комплексно учитывающим основные геометрические параметры шва. Способы определения коэффициента концентрации напряжений для стыкового шва, основанные на приближенной теории деформаций прерывистых связей (В.М.Небылов, Д.И.Навроцкий) не являются точными, так как формы прерывистых связей, принятые в расчетных схемах, лишь в малой степени отражают действительную форму шва.

В наибольшей мере соответствует форме усиления (проплава) стыкового шва криволинейный контур, предложенный Г.Нейбером при решении задачи о пластине с выступом. Решение Г.Нейбера использовано в методике оценки формы стыкового шва, предложенной И.И.Макаровым. Согласно этой методике коэффициент концентрации напряжений стыкового шва в соединении без смещения кромок определяется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\phi} &= \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_H} = 1 + \frac{(1+4V_0^2) \sqrt{(1+V_0^2) - V_0}}{4V_0(1+2V_0^2)} \\ b/\rho &= \frac{1}{4V_0^3} \sqrt{\frac{1+20V_0^2 - 8V_0^4 - (1-8V_0^2)^{3/2}}{2(1+V_0^2)}} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где: V_0 – параметр криволинейного контура; b/ρ – отношение полуширины усиления шва к радиусу сопряжения основного наплавленного металла.

Возможность использования формул (I) для сравнительной оценки коэффициента α_{ϕ} в швах АМг–6 толщиной до 80 мм подтверждена экспериментально при испытаниях статическим растяжением (+20°C) макетных образцов соединений с односторонним усилением из основного металла АМг–6. Материал обнаруживает чувствительность к концентрации напряжений при всех комбинациях параметров "В" и "С", характерных

для стыковых соединений АМГ-6 толщиной 4-30 мм. Для практических целей значения коэффициента α_ϕ по формулам (1) просчитаны на ЭЦМ "Минск-22" в широком диапазоне значений b/ρ .

Наличие смещения кромок может быть учтено коэффициентом $\alpha_{см}$, полученным (И.И.Макаров, Т.М.Емельянова) на основании решения дифференциального уравнения для упругой линии по схеме точечного соединения, примененной В.М.Сагалевичем: $\alpha_{см} = 1 + 3\lambda$ (2), где λ - величина относительного смещения. Общая величина коэффициента концентрации напряжений стыкового шва выражается произведением:

$$\alpha = \alpha_\phi \cdot \alpha_{см} \quad (3).$$

Коэффициенты концентрации напряжений, вызываемой непроваром швов, могут быть определены с использованием зависимостей, полученных И.И.Макаровым - для корневого непровара (односторонняя сварка), и Е.К.Орленковым - для непровара центра шва (двусторонняя сварка).

Поры, как правило, располагаются внутри шва и, следовательно, плоская задача теории упругости в данном случае неправомерна. Аналитически объемная задача решена только для единичной сферической (Саутвелл, М.А.Садовский, Е.Штернберг) или эллипсоидальной (Г.Нейбер, М.А.Садовский, А.И.Лурье) полости. Согласно решению Г.Нейбера для эллипсоидальной выточки без осевого сверления в теле вращения, частным случаем которой является сфера, максимальные напряжения возникают у дна сферической выточки в наиболее узком поперечном сечении и характеризуются величиной коэффициента концентрации $\alpha_D = 2,04$.

В задачи данной работы входила экспериментальная проверка решения Г.Нейбера для двух случаев нагружения (поверхностными и объемными силами), а также экспериментальное решение трехмерной задачи о распределении напряжений в упругой области около полостей, имитирующих поры различного расположения в сварных швах: 1) единичная пора на поверхности (полусфера); 2) цепочка из трех одинаковых сферических пор на расстоянии $2d$ между центрами; 3) цепочка из двух неодинаковых пор, из которых одна имеет форму сферы, а другая (на расстоянии $1,0d$ от первой) - сфероида (цилиндр длиной $2d$ по образующей с полусферами на концах).

Для решения поставленной задачи применен поляризационно-оптический метод исследования напряжений с использованием способа "замораживания" деформаций. Исследования проводились⁸⁸⁾ на сборных объемных моделях из оптически активного компаунда ЭД-5+МТФА (метилтетрагидрофталевый ангидрид). Нагружение моделей с единичной внутренней порой (проверка теоретического решения) производилось

⁸⁸⁾ При консультативной помощи и на оборудовании ЛИН МИСИ им.Куйбышева.

двумя способами: равномерно распределенной по торцам модели сжимающей нагрузкой и массовыми (объемными) силами собственного веса модели в силовом поле специально оборудованной центрифуги. Для сопоставления в тех же условиях были нагружены плоские модели с центральным круглым отверстием. При нагружении моделей в центрифуге представляло интерес выяснить влияние массовых сил на распределение напряжений при наличии объемных и плоских концентраторов, что может иметь значение для некоторых сварных конструкций. Модели для исследований по п.п. I-3 нагружались распределенной по торцам нагрузкой (сжатие). Величина нагрузки выбиралась из условия получения в зоне концентраторов, максимальных напряжений, не превышающих $0,5 \sigma_T$ материала.

Напряженное состояние в моделях исследовалось на срезах в плоскостях действия наибольших главных и максимальных касательных напряжений. Разделение напряжений производилось по способу разности касательных напряжений. Найденные экспериментально коэффициенты концентрации для внутренней единичной поры составили: при действии распределенной нагрузки $\alpha_{T_{max}} = 2,07$; при действии массовых сил $\alpha_{T_{max}} = 2,11$. Таким образом, получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Основное влияние массовых сил проявляется в несимметричном распределении напряжений по вертикальной оси моделей (в направлении действия нагрузки).

Коэффициент концентрации напряжений для поверхностной поры (полусферическая выточка) $\alpha_{T_{max}} = 2,06$ практически не отличается от коэффициента концентрации для внутренней сферической поры.

В цепочке из трех одинаковых выточек (пор) при расстоянии между центрами $2r$ каждая выточка работает как отдельный концентратор, не оказывающий влияния на величину, характер распределения и градиент изменения напряжений другого концентратора, т.е. подобно единичной внутренней поре.

Наличие цепочки из двух неодинаковых по форме и размерам пор вызывает некоторое изменение в распределении напряжений на участке между ними. Максимальные напряжения (в середине цилиндрической поверхности сфероида) выше номинальных в $\sim 2,5$ раза. Величина $\alpha_{T_{max}} = \sim 2,5$ является средней между теоретическими коэффициентами концентрации для пластины с круглым отверстием ($\alpha_T = 3,0$) и материала со сферической полостью ($\alpha_T = \sim 2,0$). Значение $\alpha_{T_{max}} = \sim 2,5$ удовлетворительно согласуется с величиной коэффициента концентрации, найденной теоретически для эллипсоида с соотношением полуосей в поперечном и продольном направлении (как и для рассмотренного сфероида), соответственно 1,0 и 0,33; и равном $\alpha_{T_{max}} = \sim 2,7$.

Ставилась задача установить связь между статической прочностью и геометрическими параметрами технологических концентраторов (наружных и внутренних), характерных для соединений АМг-6 толщиной до 30 мм. Методика испытаний предусматривала определение характеристик прочности и пластичности по результатам осесимметричного статического растяжения (до разрушения) при температурах +20 и -196°C сварных образцов толщиной 4, 10 и 30 мм. Перед проведением испытаний швы образцов обмерялись с регистрацией величин " ρ_{min} " и " B_{max} " и определением коэффициентов концентрации напряжений стыкового шва α_ϕ и α по формулам (1-3). Заключение о конструктивной прочности соединений производилось по результатам испытаний статическим внутренним давлением сварных шар-баллонов диаметром 162 и 182 мм с толщиной стенки соответственно 2 и 4 мм, а также при испытаниях гидростатическим выпучиванием сварных образцов размерами 1500x1500x16 мм. Низкотемпературные испытания соединений толщиной 10 и 30 мм в среде жидкого азота проводились в специальном приспособлении, позволяющем использовать типовое оборудование.

Повышение прочности основного металла АМг-6 при температуре -196°C (по сравнению с прочностью при комнатной температуре) для листов толщиной 10 и 30 мм примерно одинаково и составляет ~ 25%. Наплавленный металл швов толщиной 10 мм имеет более высокие механические свойства, чем наплавленный металл швов толщиной 30 мм, что объясняется различием в технологии сварки. Криогенная температура (-196°C) не приводит к повышению пластических свойств наплавленного металла, как это наблюдается в основном металле.

Статистический анализ геометрических параметров швов, проведенный для соединений без смещения кромок и со смещением до 20-25%, позволил заключить, что о позиций концентрации напряжений нет оснований ожидать существенного различия в прочностных показателях соединений толщиной 10 и 30 мм без дефектов (при данной технологии сварки), так как средние значения коэффициентов α_ϕ для этих соединений практически совпадают. Значительное уменьшение (втрое) величины радиуса " ρ_{min} " при переходе с толщины 30 мм (двусторонняя сварка) на толщину 10 мм (односторонняя на подкладке) компенсируется соответствующим уменьшением параметра "В". Аналогичное заключение сделано в отношении соединений с малым (до 10%) смещением. Прочность соединений толщиной 10 мм со смещением 20-25% должна быть ниже прочности соединений толщиной 30 мм с таким же смещением, так как для соединений меньшей толщины значения коэффициента α на

15-20% выше, что объясняется менее благоприятными условиями формирования шва при сварке на подкладке.

Это подтверждено результатами испытаний при температурах +20 и -196°C. Наличие усиления и проплава в соединениях с необработанным швом приводит к падению их прочности, что подтверждает чувствительность соединений АМг-6 к концентрации напряжений. Снижение предела прочности при увеличении коэффициента α_{ϕ} прослеживается на всем исследованном диапазоне толщин при обеих температурах испытаний.

Ухудшение формы проплава при сварке на подкладке (соединения толщиной 10 мм) и, как следствие, резкое увеличение коэффициента концентрации напряжений стыкового шва (при смещении 20-25% $\alpha \approx 5,7$) приводит к существенному снижению статической прочности; коэффициент прочности соединений со смещением 20-25%, подсчитанный по отношению к $\sigma_{\text{в}}$ соединений без смещения, составляет $K=0,6-0,7$. При сварке с двух сторон снижение прочности меньше, однако с увеличением толщины темп снижения прочности в зависимости от величины смещения растет. Криогенная температура характера влияния смещения кромок на прочность соединений не меняет, но по абсолютной величине показатели прочности, соответствующие температуре -196°C, на 20-25% выше, чем при +20°C.

Единичные нормы сферической формы диаметром 1,5-2,0 мм прочности соединений с усилением не снижают ($T_{\text{исп}} +20^\circ\text{C}$); в изломах швов ($\delta=4$ мм) поры наблюдаются только в случае, если они располагаются на границе сплавления основного и наплавленного металла, либо при снятии усиления и проплава. Поры ($d_{\text{п}}=1,5-2,0$ мм), имеющие острые края или сопровождающиеся окисными пленками небольшой протяженности (1,0-1,5 мм), снижают прочность ~ на 10% против прочности соединений без пор вне зависимости от наличия усиления и проплава шва. При большой загазованности швов, приводящей к образованию сетки сливающихся пор значительной протяженности (до 60% длины шва), коэффициент прочности соединений $K=\sigma_{\text{с}}^2/\sigma_{\text{с}}^{5,2}$ падает до 0,63-0,74 (меньшее значение - для швов без усиления и проплава). Таким образом, и в соединениях малой толщины ($\delta=4$ мм) влияние пор в большей мере проявляется при удалении проплава и усиления шва, или, когда $\alpha < \alpha_{\text{г}}$. С учетом этого статическая прочность соединений толщиной 10 и 30 мм не последовалась; основное внимание было уделено прочности соединений с порами при переменных нагрузках.

Непровар в середине швов со снятым усилением снижает прочность в большей степени, чем этого следовало бы ожидать при отсутствии

чувствительности к дефекту. Проплав и усиление шва несколько повышают прочность соединений с непроваром, однако полной компенсации потери прочности за счет дефекта не наблюдается. Криогенная температура (-196°C) не изменяет характера зависимости прочности соединений от площади непровара, полученной при $+20^{\circ}\text{C}$.

Оксидные пленки, как и непровар при просвечивании практически не выявляются. Наиболее опасны оксидные пленки в соединениях толщиной 4 мм без усиления и проплава; ослабление сечения шва пленками всего на 1-2% вызывает снижение прочности на II-17%; при площади дефекта 6-10% от расчетного сечения шва статическая прочность снижается на 40% по сравнению с прочностью качественного соединения. Наличие усиления и проплава значительно уменьшает влияние пленок на прочность соединений ($\delta = 4$ мм), однако полной компенсации не наблюдается. По результатам испытания соединений толщиной 30 мм с оксидными пленками, имеющими характер межслойного несплавления, за параметр при оценке влияния пленок на прочность соединений следует брать площадь ослабления сечения шва, либо размер пленки по глубине (толщине) шва.

Если считать существующие в настоящее время нормативы действующими и в отношении соединений толщиной 30 мм, то максимально допустимая площадь пленки должна составлять 3% от площади сечения шва ("брутто"), даже при условии, что пленка имеет глубину, равную длине ($l = l$, что маловероятно, так как обычно $l > l$). Согласно полученным экспериментальным данным безопасный для прочности соединений, работающих на статические нагрузки, размер оксидной пленки в шве может быть несколько больше 3% от площади шва длиной 30 мм (до 8-10%), однако ограниченное количество испытанных образцов не позволяет рекомендовать расширение допуска на величину оксидной пленки в шве.

Показатели статической прочности при двухосном напряженном состоянии с компонентами напряжений $\sigma_1 = \sigma_2$, определенные без учета утонения стенки в месте разрушения, в среднем несколько ниже аналогичных характеристик при одноосном растяжении. Однако небольшая разница в величине указанных характеристики, не превышающая 10-15%, как для качественных соединений, так и для соединений с технологическими отклонениями (поры, смещение кромок), позволяет с допустимой погрешностью судить о конструктивной прочности соединений (толщиной до 15-16 мм) по результатам испытаний плоских образцов шириной 80-85 мм.

Заключение о вибрационной прочности соединений производилось по ограниченному (временному) пределу выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты усталостных испытаний подвергались статистической обработке с определением коэффициентов уравнений эмпирических линий регрессии и построением усталостных кривых в двойных логарифмических и полулогарифмических координатах.

Основная часть усталостных испытаний проведена при характеристике асимметрии цикла $r = 0,1$. Некоторая часть образцов (в основном при -196°C) испытывалась при характеристике цикла $r = 0,3$. Сопоставление пределов выносливости при характеристиках $r = 0,1$ и $r = 0,3$ производилось посредством коэффициента $\gamma_r = 1,2$, полученного по результатам испытаний основного металла при температуре $+20^\circ\text{C}$. Результаты этих испытаний, а также испытаний качественных соединений с усилением и проплавом позволили построить приближенные диаграммы предельных циклов.

Как и при статическом нагружении, выносливость сварных стыковых соединений АМГ-6 зависит от коэффициента концентрации напряжений стыкового шва, но в значительно большей степени. Предел выносливости качественных соединений с обработанным швом ($\alpha = 1$) при температуре $+20^\circ\text{C}$ на 15-20% ниже предела выносливости основного металла. Наличие усиления и проплава снижает выносливость соединений на 40% (эффективный коэффициент концентрации $\beta = 1,6$). Коэффициенты концентрации напряжений стыкового шва для соединений толщиной 4, 10 и 30 мм находятся в одних пределах ($\alpha = 1,6-2,7$), что обуславливает их одинаковую усталостную прочность ($\sigma_r = 5,2-5,6$ кг/мм²), т.е. увеличение толщины с 4 до 30 мм не изменяет выносливости соединений. Температура -196°C вызывает повышение выносливости сварных соединений толщиной как 10, так и 30 мм в равной степени (на 20-30%).

Ранее было показано (И.И.Макаров, Т.М.Емельянова), что выносливость соединений со смещением кромок подчиняется теоретической зависимости $\sigma_r^{\text{см}} = \sigma_r^{\text{без см.}} / \alpha_{\text{см}}$ (4), удовлетворительно подтвержденной экспериментальными данными для сварных соединений алюминиевых сплавов и низкоуглеродистых сталей толщиной до 10 мм. В настоящей работе ставилась цель выяснить справедливость теоретической зависимости (4) для соединений АМГ-6 толщиной до 30 мм при нормальной ($+20^\circ\text{C}$) и криогенной (-196°C) температурах. Исследовалась выносливость стыковых соединений толщиной 10 мм со смещением 20-25%

и толщиной 30 мм со смещением 5-10 и 17-20%. Сопоставление по эффективному коэффициенту концентрации показывает, что соединения со смещением кромок до 10% по выносливости не отличаются от соединений с усилением и проплавом без смещения при обеих температурах. Увеличение смещения кромок до 18-20% приводит к снижению выносливости при +20°C толстолистовых ($\delta = 30$ мм) соединений втрое. Аналогичное снижение выносливости при смещении 22-25% имеет место и для соединений толщиной 10 мм. При криогенной температуре испытаний степень снижения вибрационной прочности соединений за счет смещения кромок несколько меньше: коэффициенты β для соединений толщиной 10 и 30 мм соответственно равны 2,2-2,3 и 1,8. Полученные экспериментально значения предела выносливости соединений со смещением кромок при температурах +20 и -196°C хорошо вписываются в теоретическую кривую, построенную по зависимости (4).

Оценка вибропрочности соединений толщиной 30 мм с непроваром в центре шва осуществлялась по результатам испытаний на базе $1 \cdot 10^5$ циклов. Эффективные коэффициенты концентрации β соединений с непроваром в пересчете на базу $2 \cdot 10^6$ цикл. составили для температур +20 и -196°C соответственно 2,30-2,43 и 1,47-1,55.

При одновременном наличии в шве смещения кромок и центрального непровара следует принимать во внимание теоретические коэффициенты концентрации, характеризующие эти дефекты. Критическая глубина непровара в соединении толщиной 30 мм (двусторонняя сварка) со смещением $\sim 20\%$ составляет согласно экспериментальным данным около 12-15%; коэффициенты α и α_T в этом случае близки по величине.

Влияние пористости на выносливость стыковых соединений АМг-6 зависит от величины коэффициента концентрации напряжений стыкового шва α , а также от формы и расположения пор в сечении шва. От площади пор выносливость зависит незначительно. Проплав и усиление шва в соединениях толщиной до 30 мм без внутренних дефектов в эксплуатационных условиях могут быть более опасны, чем единичные поры $\alpha_y < 2,0$ мм - в швах толщиной 4 мм и $\alpha_y < 3,5-4,0$ мм - в швах толщиной 30 мм, причем, не только сферической формы (неокисленные), но и имеющие острые края или сопровождающиеся окисными пленками длиной 1,0-1,5 мм. Не представляют опасности для соединений с усилением и проплавом и цепочки несливающихся мелких пор ($\alpha < 0,5$ мм), соизмеримых с неплотностями основного металла, даже при протяженности дефекта по всей длине шва.

Для оценки влияния окисных пленок испытывались образцы толщиной 4 и 30 мм, швы которых содержали окисные пленки двух основ-

ных типов: располагавшихся у поверхности на периферии сечения шва и центрального расположения.

В соединениях с обработанным швом ($\delta = 30$ мм) окисные пленки первого типа (подповерхностного) длиной 2–8 мм на длине шва 30 мм снижают выносливость на 10% по сравнению с качественными соединениями ($\beta = 1, 10$). Увеличение протяженности дефекта такого типа до 40–60% от длины шва (при площади 3–5% от площади сечения шва F_0) снижает выносливость в 2, –3,0 раза ($\beta \approx 2, 8$). Выносливость соединений с окисными пленками в середине сечения по всей длине шва (площадь ослабления сечения 5–13%) оценена ориентировочно ($\beta \approx 4, 5$) по данным испытаний ограниченного числа образцов. Как и в предыдущем случае, окисные пленки по влиянию на вибропрочность следует рассматривать как непровар.

Выносливость соединений с усилением и проплавом, в швах которых были обнаружены окисные пленки подповерхностного типа протяженностью 80–100% от длины шва (площадь ослабления сечения 4–7%), соответствует выносливости соединений без усиления и проплава с дефектами такого же типа, но протяженностью 40–60% от $l_{\text{шва}}$.

По данным испытаний соединений $\delta = 4$ мм (шов не обработан) увеличение длины окисной пленки примерно вдвое (с 40–60 до 80–100%) при одинаковой глубине снижает выносливость на 25%.

Предел выносливости соединений толщиной 4 мм (шов не обработан) с окисными пленками у поверхности площадью 15–25% F_0 находится на уровне σ_r соединений толщиной 30 мм с пленками приблизительно вдвое меньшей площади (5–13% F_0). В определенной мере в этом может находить свое отражение действие масштабного фактора.

Предел конструктивной выносливости по результатам испытаний сварных шар-баллонов пульсирующим внутренним давлением ($+20^\circ\text{C}$; $r = 0,6$) на 20% ниже предела выносливости образцов ($\delta = 4$ мм) при одноосном растяжении, испытанных в тех же условиях (при $r = 0,6$). Необходимо отметить, что коэффициенты α , характеризующие швы шар-баллонов и плоских образцов различаются на ту же величину 20% (больше для швов образцов). Таким образом, усложнение схемы нагружения не вносит существенных коррективов в характеристики выносливости тонколистовых соединений.

Степень снижения выносливости при наличии в швах шар-баллонов пор приблизительно такая же, как и при испытаниях на одноосное растяжение. К аналогичному выводу привели испытания шар-баллонов с окисными пленками в швах, имеющими характер несплавления в корне, т.е. подобными непровару корня шва.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Изучены по рентгенограммам и на изломах образцов наиболее часто встречающиеся технологические отклонения в швах АМг-6 толщиной до 30 мм. Установлено, что с ростом толщины свариваемых стык листов АМг-6 (многослойная сварка) преобладающими дефектами становятся окисные пленки и включения, а также смещение кромок.

2. Определена возможность применения и отработана на толстолистовых соединениях методика оценки концентрации напряжений, вызываемой формой шва. Исследовано влияние коэффициента α на прочность стыковых соединений АМг-6 толщиной до 30 мм при нормальной и криогенной температурах.

3. Показана применимость специальных методов фотоупругости для экспериментального решения задач об объемно-напряженном состоянии металла шва с внутренними дефектами; найдены максимальные значения коэффициентов концентрации для четырех вариантов пористости.

4. Проведены в среде жидкого азота статические и усталостные испытания соединений с технологическими концентраторами. Чувствительность соединений АМг-6 к концентрации напряжений при температуре -196°C не выше, чем при $+20^{\circ}\text{C}$, а в некоторых случаях заметно снижается.

5. В результате исследования статической и вибрационной прочности соединений существенного влияния толщины в диапазоне 4-30 мм для образцов испытанного типа не обнаружено при обеих температурах ($+20$ и -196°C).

6. На примере соединений АМг-6, качественных и с порами, показано, что оценка их конструктивной прочности с допустимой погрешностью может производиться по результатам испытаний плоских образцов ограниченных размеров (шириной 85-40 мм).

7. Подтверждена возможность оценки степени опасности внутренних дефектов сопоставлением теоретических коэффициентов концентрации напряжений, характеризующих внутренние и внешние неоднородности шва.

8. Определены параметры чувствительности стыковых соединений АМг-6 к технологическим концентраторам при статических и вибрационных нагрузках. Найденные величины приняты к использованию в качестве исходного материала при подготовке нормативных документов по отрасли, в дополнение к соответствующим разделам стандарта ОСТ-92-III4-71. Результаты работы использованы также при разработ-

х

х

х

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Волюнский В.Н. Прочность и выносливость сварных стыковых соединений АМг-6 толщиной до 30 мм со смещением кромок при нормальной и криогенной температурах. В сб.: "Прочность сварных соединений и конструкций при переменных нагрузках." Материалы Всесоюзного семинара. ЧДНТП, Челябинск, 1974.

2. Макаров И.И., Прохоров Н.Н., Завалишин С.И. Концентрация напряжений в сварных стыковых швах с порами. В сб. "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций. Тр.МВТУ № 182, М., 1974.

3. Макаров И.И., Волюнский В.Н., Прохоров Н.Н., Шиганов Н.В., Попов О.П., Сошко И.Ф. Прочность сварных стыковых соединений АМг-6 с технологическими отклонениями при криогенных температурах. В сб. Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций. Тр. МВТУ, № 182, М., 1974.