

021.731(043)
K 669

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

КОРМАН АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С МЯГКОЙ
ПРОСЛОЙКОЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

05.03.06

Специальность 05.04.05 -

"Технология и машины сварочного производства"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1974

ЧПИ

021.731:533.4(043)

Работа выполнена в отделе металлов Уральского филиала
двух Ордена Трудового Красного Знамени Всесоюзного научно-ис-
следовательского теплотехнического института имени Ф.Э.Дзержинско-
го (УралВТИ) и на кафедре "Оборудование и технология сварочного
производства" Челябинского политехнического института имени Ленин-
ского комсомола.

Научные руководители:

профессор, доктор технических наук О.А.Бакиши;
старший научный сотрудник, кандидат технических наук
Р.Э.Шрон.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук В.Н.Землин;
старший научный сотрудник, кандидат технических наук
А.Н.Моношков.

Ведущее предприятие - Районное энергетическое управление
"Челябэнерго".

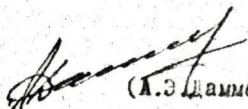
Автореферат разослан " _____ " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1975 г.

в 15 часов на заседании Совета по присуждению ученых
степеней машиностроительных факультетов Челябинского по-
литехнического института им. Ленинского комсомола
(г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76,
аудитория 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого
совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных
печатью, по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Лени-
на, 76.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент


(А.Э. Даммер)



Актуальность темы. В стационарной и транспортной энергетике, нефтехимической промышленности и других отраслях народного хозяйства широко применяются установки, работающие при высоких температурах. Одним из основных направлений повышения экономичности этих установок является непрерывное увеличение единичной мощности и параметров рабочей среды. С ростом единичных мощностей и рабочих температур установок, как правило, увеличивается объем применения сварных конструкций. Это требует всесторонней оценки работоспособности сварных соединений.

Важным фактором, влияющим на несущую способность сварных соединений является их механическая неоднородность. В зависимости от сопротивления деформированию характерные участки сварного соединения (шов, зона сплавления, участки перегрева, разупрочнения и деформационного старения) рассматриваются как мягкие или твердые прослойки. Размеры и свойства этих прослоек зависят от химического состава основного и сварочного материалов, конструктивных форм соединения, технологии сварки и условий эксплуатации. Опыт эксплуатации и данные исследований свидетельствуют о существенном влиянии на работоспособность сварных соединений участков с пониженным сопротивлением деформированию — мягких прослоек.

Детальный анализ механического поведения сварных соединений с мягкой прослойкой при различных видах деформации и нагружения в условиях обычной и низкой температур дан в работах О.А. Бакши и его сотрудников. Применительно к условиям высокотемпературной эксплуатации основные закономерности влияния мягких прослоек на жаропрочность сварных соединений изучались значительно меньше. Можно отметить в первую очередь работы В.Н. Земзина. Данные о существенном влиянии мягких прослоек на длительную прочность и пластичность сварных соединений приводятся и в работах Е.М. Кузмака, Ю.Н. Готальского, С.И. Германа, Р.Е. Мазель и др.

Теоретический анализ распределения напряжений в тонком слое, скрепленном с жесткими частями при растяжении в условиях ползучести был проведен Д.М. Качановым. На основе этого решения Р.З. Шроном была предложена схема для расчетной оценки сопротивления ползучести, длительной прочности и долговечности сварных соединений с мягкой прослойкой. Однако эта схема не подвергалась

экспериментальной проверке. Кроме того в ней предусмотрены только случаи "чисто вязких" и "чисто хрупких" разрушений, в то время как на практике во многих случаях наблюдается смешанное разрушение. Не рассматривался в общей постановке и вопрос о длительной пластичности сварных соединений с мягкой прослойкой. Сказанное предопределяет актуальность систематического исследования влияния мягких прослоек на прочность сварных соединений в условиях высокой температуры.

Цель работы состояла в том, чтобы в качестве первого шага применительно к наиболее простому случаю — статическому растяжению установить основные закономерности изменения жаропрочных свойств сварных соединений с мягкой прослойкой. Это даст отправной материал для оценки работоспособности при высоких температурах сварных соединений с мягкой прослойкой и рекомендаций по повышению их эксплуатационной надежности. Требовалось определить, как зависят основные показатели жаропрочности сварных стыковых соединений: временное сопротивление, деформационная способность, место и характер разрушения при кратковременном, а также сопротивление ползучести, длительная прочность и пластичность при длительном воздействии растягивающей нагрузки от размеров мягкой прослойки, соотношения ее свойств и основного металла и условий эксплуатации.

Общая методика выполнения исследования. Объектом исследования являлось схематизированное сварное соединение, состоящее из материалов с различным сопротивлением деформированию: твердого (основного) металла и мягкого металла прослойки. В качестве обобщенной геометрической характеристики формы и размеров прослойки принималась ее относительная толщина \mathcal{K} , определяемая отношением толщины прослойки h к минимальному размеру поперечного сечения свариваемого металла d .

Рассматривались случаи кратковременного и длительного нагружения.

Для случая кратковременного растяжения экспериментально исследовались на образцах, моделирующих сварные соединения, зависимости прочностных и пластических свойств в условиях высокой

температуры от относительной толщины прослойки и степени механической неоднородности. Так как при повышении температуры чувствительность материалов к скорости деформации увеличивается, то рассматривалось влияние на кратковременную статическую прочность сварного соединения фактора скоростного упрочнения металла мягкой прослойки.

Для случая длительного нагружения экспериментально исследовались на образцах, моделирующих сварные соединения, закономерности изменения сопротивления и скорости ползучести, длительной прочности и долговечности мягких прослоек в составе сварных соединений в зависимости от параметра \mathcal{E} , степени механической неоднородности, а также температуры испытания. Теоретический анализ основывался на решениях Л.И. Качанова и расчетной схеме, предложенной Р.Э. Шроном. Указанная схема получила дальнейшее развитие, что позволило распространить ее на область смешанных разрушений. Рассматривались также закономерности изменения длительной пластичности мягких прослоек. Установленные закономерности изменения жаропрочных свойств сварных соединений сопоставлялись с результатами испытаний реальных соединений. Сформулированы рекомендации по повышению их эксплуатационной надежности и оценке несущей способности.

Научная новизна и практическая ценность. Экспериментально установлены основные закономерности изменения жаропрочных свойств стыковых сварных соединений с мягкой прослойкой в широком диапазоне значений ее относительной толщины и степени механической неоднородности. Впервые показано, что при расчетной оценке кратковременной статической прочности сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях высокой температуры наряду с контактным упрочнением необходимо учитывать и скоростное упрочнение металлов, обусловленное усилением их чувствительности к скорости деформации с ростом температуры. Показана возможность использования для расчетной оценки кратковременной прочности сварных соединений с мягкой прослойкой при высоких температурах формул той же конструкции, что и для условий пластической деформации при обычной температуре, но с подстановкой в них соответствующих свойств при данной температуре и коэффициента скоростного упрочнения.

Подтверждена экспериментально предложенная ранее схема расчетной оценки жаропрочных свойств мягких прослоек в условиях пол-

зучести. На основе использования решения Л.М. Качанова впервые предложена зависимость для оценки времени до разрушения мягкой прослойки в области смешанных разрушений. Установлены основные закономерности изменения деформационной способности мягких прослоек в условиях ползучести.

На основе результатов работы даны рекомендации по учету влияния мягких прослоек на несущую способность высокотемпературных сварных конструкций. Предложены дифференцированные значения коэффициента прочности сварных соединений паропроводов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ.

Реализация работы. Основные результаты работы и основанные на них рекомендации отражены в разработанных ЦКТИ при участии УралВТИ руководящих технических материалах "Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций энергетических машин". Эти результаты использовались также при оценке несущей способности и эксплуатационной надежности сварных соединений паропроводов мощных энергоблоков ряда электростанций страны.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научно-технических семинарах кафедры сварки ЧПИ и отделения металлов УралВТИ, на научно-технических конференциях в гг. Ленинграде, Киеве, Челябинске, Кургане, Ижевске.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей.

Объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов с рекомендациями и приложения. Она содержит 126 страниц машинописного текста, 110 рисунков. В списке литературы 122 наименования.

Первая глава содержит обзор литературных данных, касающихся условий возникновения мягких прослоек в сварных соединениях, которые эксплуатируются при высокой температуре, а также влияния мягких прослоек на жаропрочность сварных соединений. Показано, что в сварных соединениях теплоустойчивых и жаропрочных сталей и сплавов шов является мягкой прослойкой в случае применения сварочных материалов менее легированных, чем основной металл. Шов может быть мягкой прослойкой и при использовании электродов того же уровня легирования, что и основной металл, если в результате

принятых режимов сварки, термообработки или условий эксплуатации металл шва приобретает структуру с пониженным сопротивлением деформированию. В сварных соединениях термически упрочненных перлитных и высокохромистых феррито-мартенситных сталей мягкая прослойка образуется в зоне термического влияния на участке, нагретом при сварке до температур близких к критической точке A_c . Термическая обработка таких сварных соединений по режиму высокого отпуска не устраняет мягкую прослойку. Для сварных соединений разнородных сталей характерно появление мягких (обезуглерожженных) прослоек в зоне сплавления в процессе термической обработки или эксплуатации.

Анализ опыта эксплуатации и результаты исследований показывают, что прочностные и пластические свойства сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях высокой температуры существенно зависят не только от относительной толщины α , но и от температуры и продолжительности эксплуатации. Систематических исследований с целью изучения закономерностей влияния мягких прослоек сварных соединений на их жаропрочность не проводилось.

Во второй главе излагаются постановка задач, программа и методика исследования.

Условия появления мягких прослоек, а также зависимость их размеров и свойств от конструктивных форм, технологии сварки, температуры и продолжительности эксплуатации для разных участков сварных соединений отличаются между собой, однако природа действия механического фактора, обусловленного их наличием, одинакова. Независимо от места расположения и геометрической формы мягкой прослойки действие механического фактора обусловлено концентрацией в ней пластических деформаций и развитием сложнапряженного состояния из-за стеснения деформации прилегающим более прочным металлом. В связи с этим для облегчения поставленной задачи целесообразно рассматривать схематизированное сварное соединение, состоящее из двух материалов с различным сопротивлением деформированию: основного металла и мягкого металла прослойки.

Экспериментальное исследование проводилось на образцах, моделирующих сварные соединения с мягкой прослойкой. Было изготовлено шесть серий образцов, отличающихся размерами ($\varnothing 10$ и 25 мм) и степенью механической неоднородности свойств основного металла

и прослойки. Для изготовления образцов в качестве основного металла использовались низколегированная конструкционная сталь марки 45Х и теплоустойчивая сталь марки 12Х1МФ. В качестве металла мягкой прослойки применялись малоуглеродистые стали марок 10, 10 кп, 20, а также свинец марки С2. Мягкая прослойка из стали вваривалась в образцы с помощью сварки трением. Для получения образцов с прослойкой из свинца, последний в расплавленном виде заливали в зазор между половинками образца из низкоуглеродистой стали марки Ст.3 после предварительного нанесения на их торцы свинцового покрытия. После сварки образцы с прослойкой из стали подвергали полной термической обработке (закалке с последующим высоким отпуском). Образцы с прослойкой из свинца отжигали при температуре 200°С в течение 1 часа. Значения относительной толщины прослойки α (от 0,01 до 1,98) варьировали в образцах каждой серии за счет изменения толщины прослойки h .

Кратковременные высокотемпературные испытания образцов проводили в соответствии с ГОСТ 9651-61 при скорости деформирования 4 мм/мин на разрывной машине типа УМ-5. Длительные испытания образцов \varnothing 10 мм осуществляли на машинах типов АИМА-5, МП-1200 и МП-4Г, а образцов \varnothing 25 мм на установках конструкции Н.Д.Зайцева в ЦКТИ. Образцы с прослойкой из стали испытывали в интервале температур 400-550°С продолжительностью до 9000 часов. Испытания образцов с прослойкой из свинца проводили при комнатной температуре. Длительность их достигала 270 часов.

Кроме испытаний образцов, моделирующих сварные соединения с мягкой прослойкой, проводили испытания на длительную прочность под внутренним давлением труб \varnothing 133x10 мм из стали 12Х1МФ с продольным сварным швом. Сварка выполнялась электродами ЦЛ-20М \varnothing 3 мм в четыре прохода с предварительным подогревом 300°С при погонной энергии 4-5 ккал/см. После сварки производился отпуск образцов при температуре 730°С в течение трех часов. Испытания проводились на специально созданном для этих целей стенде. Внутреннее давление в образцах создавали с помощью азота, сжатие которого до требуемого давления осуществляется водой в сосудах-аккумуляторах. Образцы испытывали при температуре 600°С. Максимальная продолжительность испытания составила 2000 часов. Результаты испытаний обрабатывали в функции параметра Ларсона-Миллера.

Третья глава посвящена влиянию мягких прослоек на кратковременную прочность сварных соединений при высоких температурах. Установлено, что в условиях высокой температуры зависимости кратковременных прочностных и пластических свойств (временного сопротивления разрыву, относительного сужения, относительного удлинения), а также места и характера разрушения сварных соединений с мягкой прослойкой от относительной толщины \mathcal{X} и степени механической неоднородности имеют такой же характер, как и в условиях обычной и низкой температур. В области значений $\mathcal{X} < 1,0$ временное сопротивление возрастает, а деформационная способность изменяется по кривой, имеющей минимум. Показано, что на изменение деформационной способности сварного соединения с повышением температуры наряду с изменением пластических свойств мягкого металла оказывает влияние и изменение коэффициента механической неоднородности вследствие разной температурной зависимости прочностных свойств основного и мягкого металлов.

Для расчетной оценки кратковременной прочности сварных соединений с мягкой прослойкой при высоких температурах могут использоваться формулы, аналогичные по конструкции тем, которые применяются для обычных температур, но с подстановкой в них временного сопротивления или предела текучести при данной температуре. Кроме того, в дополнение к контактному упрочнению при статическом растяжении сварного соединения с мягкой прослойкой в условиях высокой температуры может заметно проявляться эффект скоростного упрочнения металла прослойки, имеющей меньшую по сравнению с однородным образцом базу деформации. Поэтому для оценки статической прочности сварного соединения при высокой температуре в расчетную формулу предлагается вводить кроме коэффициента контактного упрочнения, коэффициент $K_{\dot{\epsilon}}$, учитывающий скоростное упрочнение мягкой прослойки

$$K_{\dot{\epsilon}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}^M}{\dot{\epsilon}_0^M} \right)^{n^M} \quad (I)$$

где $\dot{\epsilon}_0^M$ - скорость деформации однородного образца, $\dot{\epsilon}^M$ - скорость деформации мягкой прослойки в составе сварного соединения, n^M - коэффициент чувствительности металла мягкой прослойки к скорости деформации, зависящий от химического состава материала, гомологической температуры и степени деформации. Таким образом,

Формула для расчетной оценки временного сопротивления сварного соединения с мягкой прослойкой при статическом растяжении в условиях высокой температуры имеет вид:

$$(\sigma_{st}^M)_x = \sigma_{st}^M \cdot K_x \cdot K_\dot{\epsilon}, \quad (2)$$

или в развернутой форме для случая осесимметричной деформации:

$$(\sigma_{st}^M)_x = \sigma_{st}^M \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}x} \right) \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}^M}{\dot{\epsilon}_0^M} \right)^{n_6^M}, \quad (3)$$

где σ_{st}^M - временное сопротивление свободно деформируемого металла мягкой прослойки при скорости деформации образца $\dot{\epsilon}_0^M$ и температуре t , K_x - коэффициент контактного упрочнения, n_6^M - коэффициент чувствительности металла мягкой прослойки к скорости деформации при температуре t .

Экспериментальная проверка формулы (3), проведенная на образцах одной из серий при температурах испытания 400°C ($K_\beta = \frac{\sigma_{st}^M}{\sigma_{st}^M} = 2,39$) и 500°C ($K_\beta = 3,28$) показала удовлетворительную сходимость расчетных и опытных значений временного сопротивления. Величина коэффициента n_6^M определялась по результатам испытаний однородных образцов из металла прослойки в интервале скоростей деформации $1,3 \cdot 10^{-3}$ - $3,3 \cdot 10^{-2}$ сек⁻¹.

В области значений относительной толщины прослойки $x < x_{\beta 6}$, где в деформации участвует основной металл, роль скоростного упрочнения снижается и при расчетной оценке кратковременной прочности оно может не учитываться.

При линейной зависимости временного сопротивления разрыву от температуры в координатах $\lg \sigma - t$ снижение прочности металла прослойки с ростом температуры предлагается учитывать введением в расчетную формулу (3) температурного коэффициента

$$K_t = e^{-\alpha(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Здесь e - основание натуральных логарифмов, t_1 и t_2 - температуры ($t_2 > t_1$), α - константа, зависящая от рода материала и скорости деформации. Таким образом, для расчетной оценки прочности сварного соединения во всем температурном интервале может быть

использовано известное значение временного сопротивления при одной температуре.

Если скорости деформации прослоек относятся к докристаллизационному участку и величина коэффициента чувствительности их металла меняется в некотором диапазоне температур в незначительных пределах, то для приближенной оценки прочности сварного соединения, как показал эксперимент, может быть использована формула с объединенной температурно-скоростной зависимостью аналогичная формуле для условий ударного растяжения при низкой температуре, предложенной С.А.Бажжи, А.Н.Моношковым и Ю.И.Анисимовым. Применительно к временному сопротивлению сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях осесимметричной деформации формула имеет вид:

$$(\sigma_{st}^M)_x = \sigma_{6c}^M \left(\frac{\dot{\epsilon}_M}{\dot{\epsilon}_0^M} \right)^{n^M} \left\{ \exp \left[\frac{n^M H^M}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \right\} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3} x} \right), \quad (5)$$

где H^M — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, T_1 и T_2 — температуры в абсолютной шкале ($T_2 > T_1$).

Ч е т в е р т а я г л а в а посвящена расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях ползучести. Проведен анализ предложенной ранее расчетной схемы оценки длительной прочности сварных соединений с мягкой прослойкой и рассмотрено влияние принятых в ней условий и допущений.

В соответствии с указанной схемой можно выделить три характерные области изменения длительной прочности. Первая область соответствует сравнительно высоким напряжениям и малой временной базе, когда разрушение имеет вязкий, внутризеренный характер и сопровождается значительной пластической деформацией. В этой области эффект контактного упрочнения полностью реализуется и зависимости прочности и пластичности сварных соединений от относительной толщины мягкой прослойки имеют такой же характер, как и при обычной пластической деформации. Вторая область соответствует меньшим напряжениям и большей временной базе, при которых контактное упрочнение реализуется не полностью, так как максимальные нормальные напряжения в прослойке достигают уровня хрупкой прочности мягкого металла. Пластичность прослоек в этой области резко снижается, в то время как при свободной (нестесненной) деформации собственно мягкий металл разрушается здесь вязко. При сравнительно низких напряжениях и большой временной базе, когда разрушение имеет

хрупкий, межзеренный характер, контактное упрочнение отсутствует и длительная прочность мягкой прослойки вследствие превышения максимальными напряжениями средних по сечению может быть в 1,5-3 раза ниже, чем при свободной деформации мягкого металла.

В области вязких разрушений при сравнительно небольшом различии свойств металла прослойки и основного металла и наличии подкрепляющих прослойку участков длительная прочность сварного соединения может достигнуть уровня прочности основного металла и разрушение сместится вне зоны сварки. Для сварных соединений компактного сечения критическая величина относительной толщины прослойки, обеспечивающая равнопрочность сварного соединения с основным металлом, определяется выражением:

$$\alpha_{кр} = \frac{1}{(K_{g.б} - \frac{\pi}{4}) \cdot 3\sqrt{3} \alpha} \quad (6)$$

где $K_{g.б} = \frac{\sigma_{г.б}^T}{\sigma_{г.б}^M}$. Здесь $\sigma_{г.б}^T$ и $\sigma_{г.б}^M$ - соответственно длительная (вязкая) прочность основного металла и металла прослойки. В интервале долговечностей, где мягкая прослойка равнопрочна основному металлу, пластичность сварного соединения увеличивается благодаря вовлечению в деформацию основного металла.

В случае вовлечения в деформацию непосредственно прилегающего к прослойке металла эффект контактного упрочнения ослабляется и длительная прочность прослоек снижается, а пластичность - возрастает. В области хрупких разрушений, напротив, вовлечение в деформацию прилегающего к прослойке металла снижает уровень максимальных напряжений в прослойке и способствует повышению её длительной прочности.

Для экспериментальной проверки расчетных формул в области вязких разрушений образцы с прослойкой из стали испытывались на длительную прочность при 400°C и базе ≈ 5000 часов. В образцах с высокой степенью механической неоднородности ($K_g = 1,90-2,39$) основной металл не вовлекался в деформацию, а в образцах с малой степенью механической неоднородности ($K_g = 1,41$) вовлечение основного металла в приконтактной области достигало величины

$$\psi_{\kappa}^T = 25\%. \text{ Величина относительного сужения мягких прослоек}$$

в большинстве указанных образцов не снижалась меньше 20%.

Эксперимент подтвердил, что с уменьшением величины α сопротивление ползучести, длительная прочность и время до разрушения образцов с мягкой прослойкой увеличиваются, а скорость ползучести уменьшается. Экспериментальные точки, относящиеся к образцам с высокой степенью механической неоднородности, удовлетворительно согласуются с предложенными ранее Р.З. Шроном расчетными зависимостями:

$$(\sigma_c^M)_\alpha = \sigma_c^M \cdot K_\alpha \quad , (7)$$

$$(\sigma_{g\beta}^M)_\alpha = \sigma_{g\beta}^M \cdot K_\alpha \quad , (8)$$

$$(\theta_{g\beta}^M)_\alpha = \theta_{g\beta}^M (K_\alpha)^n = \frac{(K_\alpha)^n}{n B_1 \sigma_{g\beta}^M} \quad , (9)$$

$$(V_c^M)_\alpha = \frac{V_c^M}{(K_\alpha)^n} = \frac{B_1 (\sigma_c^M)^n}{(K_\alpha)^n} \quad , (10)$$

Здесь σ_c^M и $\sigma_{g\beta}^M$ - соответственно сопротивление ползучести и длительная прочность, а $\theta_{g\beta}^M$ и V_c^M долговечность и скорость ползучести металла мягкой прослойки, B_1 и n - коэффициент и показатель ползучести.

В образцах с меньшей степенью механической неоднородности наблюдалось систематическое отклонение опытных точек от расчетных кривых. Показано, что при оценке длительной прочности уменьшение степени реализации контактного упрочнения из-за вовлечения в деформацию ползучести основного металла может быть учтено по методике, аналогичной предложенной Т.В.Кульневич для условий кратковременного растяжения при обычной температуре. При этом для определения значений K_p^{min} и относительной толщины прослойки α_i в соответствующие формулы необходимо подставлять вместо K_β значения коэффициента механической неоднородности по длительной прочности $K_{g\beta}$.

Деформационная способность сварных соединений в области вязких разрушений определяется относительной толщиной мягкой прослойки и изменяется в зависимости от времени примерно в том же темпе, что и при свободной деформации мягкого металла. Для сварных соединений с малой степенью механической неоднородности ($K_g = 1,41$), имевших подкрепляющие прослойку более прочные участки, экспериментально подтверждена возможность достижения равнопрочности и переноса места разрушения с прослойки на основной металл.

По мере увеличения времени испытания образцов $K_g = 1,90$ при 400°C свыше 5000 часов, когда относительное сужение прослоек ψ^M становится меньше 20%, опытные точки отклоняются от расчетных, полученных по формулам (8) и (9), в сторону меньших значений. Другими словами, в области перехода от вязкого разрушения к хрупкому расчетная оценка длительной прочности по формулам для вязкого разрушения дает завышенные значения. В настоящей работе на основе решения Л.М. Качанова для оценки долговечности однородного металла в области смешанных разрушений предложена формула для оценки долговечности в этой области сварных соединений с мягкой прослойкой:

$$(\theta_{*})_x = (\theta_{g\delta})_x \left\{ 1 - \left[1 - \frac{n-m}{n} \cdot \frac{(\theta_{xp})_x}{(\theta_{g\delta})_x} \right]^{\frac{n}{n-m}} \right\} \quad (11)$$

Здесь θ_{*} - долговечность мягкой прослойки в области хрупких разрушений, которая определяется из выражения:

$$(\theta_{xp})_x = \frac{\theta_{xp}^M}{(K_{\mu})^m} = \frac{1}{(m+1)A(G_{xp}^M)^m (K_{\mu})^m} \quad (12)$$

где K_{μ} - коэффициент равный

$$1 + \frac{1}{1+\mu}$$

для плоской и

$$1 + \frac{2}{1+\mu}$$

для осесимметричной деформаций ($\mu = \frac{1}{n}$), A и m - постоянные материала при данной температуре. Граница между областью вязких разрушений, в которой долговечность мягкой прослойки подсчитывается по формуле (9) и областью смешанных разрушений,

в которой она подсчитывается по формуле (II) определяется выражением:

$$(\bar{\sigma})_x = \left[\frac{m+1}{n-m} \frac{A}{B_1} (K_x)^n (K_\mu)^m \right]^{\frac{1}{n-m}} \quad (19)$$

Для экспериментальной проверки формулы (II) образцы испытывали в интервале температур 400–500°C. По результатам испытаний в указанном интервале температур определяли эквивалентное время до разрушения при температуре 400°C. Это позволило получать при одной температуре и сравнительно небольшой продолжительности испытания все три области разрушения мягких прослоек. Сопоставление опытных и расчетных по формуле (II) значений долговечности показало их приемлемую сходимость. Тем самым возможности расчетной схемы оценки длительной прочности сварных соединений с мягкой прослойкой расширены за счет распространения ее на переходную область разрушения. Как показывает анализ выражения (II) и опытные данные, в переходной области разрушений линии длительной прочности имеют разный наклон к оси времен. Ранее это было обнаружено В.Н.Земзиным при испытаниях сварных соединений теплоустойчивых сталей, имеющих упрочненный участок в зоне термического влияния. Чем тоньше прослойка, тем круче линия ее длительной прочности. В этой области имеется интервал времен, в котором значения длительной прочности мягких прослоек различной толщины мало отличаются между собой и по сравнению со свободно деформируемым мягким металлом. При этом, однако, длительная пластичность прослоек отличается в несколько раз. Чем тоньше прослойка, тем меньше ее деформация до разрушения.

В области хрупких разрушений длительная прочность мягкой прослойки в составе сварного соединения оказалась ниже длительной прочности мягкого металла при его свободной деформации, что согласуется с расчетной схемой.

В п я т о й г л а в е на основе общих закономерностей поведения мягких прослоек в условиях ползучести рассматривается жаропрочность сварных соединений теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей перлитного класса.

Хромомолибденованадиевые теплоустойчивые стали перлитного класса марок 12Х1МФ и 15Х1МФ являются основным материалом для изготовления паропроводов современных энергетических установок. Опыт

эксплуатации и результаты исследований показывают, что сварные соединения этих сталей имеют пониженную несущую способность по сравнению с основным металлом. Одной из причин этого является наличие в зоне термического влияния сварных соединений разупрочненных участков - мягких прослоек. Количество повреждений, в том числе в виде сквозных разрушений, по этому участку сварных соединений в последние годы непрерывно возрастает. Анализ повреждений показывает, что отступлений от принятых режимов сварки и отпуска не было, а разрушения вызывались исчерпанием несущей способности сварных соединений под действием приложенных напряжений. Проблема снижения несущей способности сварных соединений из-за наличия в них разупрочненных участков приобретает особую актуальность в связи с применением сварноштампованных элементов паропроводов (трубы с продольным швом, шаровые тройники, колена и др.), в которых сварные соединения подвергаются полным рабочим напряжениям от внутреннего давления, в отличие от поперечных стыков паропроводов, в которых эти напряжения примерно вдвое меньше.

В настоящей работе были проведены испытания на длительную прочность под внутренним давлением сварных соединений труб из стали 12Х1МФ \varnothing 133х 10 мм с продольным швом. Относительная толщина разупрочненного участка (мягкой прослойки) составляла 0,3. Эксперимент подтвердил, что в области вязких разрушений сварное соединение с тонкой мягкой прослойкой равнопрочно основному металлу и разрушение происходит вне зоны сварки. Аналогичные результаты были получены В.Н.Земзиным при испытании на длительную прочность образцов \varnothing 8 мм ($\lambda = 0,3$) и \varnothing 28 мм ($\lambda = 0,07$) из сварного соединения стали 12Х1МФ с примерно таким же, как в наших опытах, уровнем прочности основного металла. Границей температурно-временной области равнопрочности испытанных сварных соединений и основного металла (по нижней границе его полосы разброса) можно принять значение параметра Ларсона-Миллера $P=19,5$. Это означает, что при сроке службы 100 000 часов и рабочей температуре до 510⁰С сварные соединения паропроводов из стали 12Х1МФ с толщиной стенки 10 мм и более имеют прочность не ниже уровня основного металла. При практически предельной для сварных соединений рассматриваемых сталей величине $K_{g\delta} = 2$ критическая толщина прослойки составляет $\lambda_{кр} \approx 0,14$. Так как протяженность мягкой

прослойки (h) в зоне термического влияния обычно не превышает трех миллиметров, то в области вязких разрушений равнопрочность сварных соединений паропроводов основному металлу гарантирована при толщинах стенки более 20 мм. Если коэффициент механической неоднородности меньше, то равнопрочность достигается при меньшей толщине стенки.

При значениях параметра Ларсона-Миллера $P > 19,5$ разрушения происходят по мягкой прослойке и сопровождаются прогрессирующим снижением длительной прочности сварного соединения. Поскольку разрушения имеют четко выраженный хрупкий характер, можно считать, что полученные значения прочности мягкой прослойки соответствуют предельным для сварных соединений стали 12Х1МФ с умеренным уровнем прочности. Если принять расчетный срок эксплуатации 100 000 часов, то при рабочей температуре 520°C длительная прочность сварных соединений составляет от длительной прочности основного металла 0,8, при температуре 540°C - 0,6, а при температуре 550°C - 0,55. Это означает, что уже при температуре 540°C сварные соединения стали 12Х1МФ имеют запас прочности ниже установленного действующими нормами. При температуре 550°C и выше сварные соединения фактически не имеют запаса прочности и те из них, в которых напряжения близки к допустимым, могут разрушаться в пределах расчетного срока службы, что и наблюдается на практике.

Таким образом, прочность сварных соединений перлитных теплоустойчивых сталей, имеющих мягкую прослойку в зоне термического влияния, существенно зависит от температуры и длительности эксплуатации и снижается с их ростом быстрее, чем у основного металла. В связи с этим коэффициент прочности сварных соединений Ψ целесообразно дифференцировать в зависимости от температуры эксплуатации. По предварительным данным для сварных соединений стали 12Х1МФ рекомендуются следующие значения коэффициента прочности (для расчетного срока службы 100 000 часов) при температурах до 510°C - 1,0; 510-530°C - 0,8; 530 - 550°C - 0,6. Вследствие значительного снижения коэффициента прочности при температурах 540°C и более уменьшается эффективность использования материала, особенно в элементах с продольным швом. Поэтому весьма актуальной является задача повышения несущей способности сварных

соединений в области указанных температур путем устранения мягкой прослойки в зоне термического влияния. Этого можно достичь полной термической обработкой по режиму нормализации с последующим отпускком. При этом, однако, металл сварного шва после такой термообработки должен иметь жаропрочность на уровне основного металла.

Анализ участков разрушения труб с продольным швом показал, что трещины зарождаются в средней по толщине стенки части, где в прослойке действуют максимальные нормальные напряжения. Это должно учитываться при проведении контроля сварных соединений в процессе эксплуатации.

Общие выводы

На работоспособность сварных соединений, эксплуатирующихся в условиях высокой температуры, существенное влияние оказывают участки пониженного по сравнению с основным металлом сопротивления деформированию — мягкие прослойки. Механическое поведение сварных соединений с мягкой прослойкой обусловлено явлениями концентрации деформаций в прослойке и развитием в ней сложнопластического состояния вследствие сдерживания деформаций прилегающим более прочным металлом. В результате этого в прослойке действует эффект контактного упрочнения. Указанные явления существенно зависят от относительной толщины прослойки, коэффициента механической неоднородности и условий эксплуатации.

На основе экспериментальных и теоретических исследований для случая статического растяжения установлены основные закономерности изменения жаропрочных свойств стыковых сварных соединений с мягкой прослойкой.

I. Зависимости кратковременных прочностных и пластических свойств сварных соединений при высоких температурах от относительной толщины прослойки и степени механической неоднородности имеют такой же характер, как и в условиях обычной температуры: с уменьшением относительной толщины прослойки прочность сварного соединения возрастает, а деформационная способность изменяется по кривой, имеющей минимум. С повышением температуры, в отличие от условий деформирования при комнатной и низкой температурах, наряду с контактным упрочнением может заметно проявляться эффект скоростного

упрочнения металла прослойки, обусловленный усилением чувствительности его к скорости деформации при высокой температуре.

2. Для расчетной оценки кратковременной прочности сварных соединений с мягкой прослойкой при высоких температурах предложено использовать формулы той же конструкции, что и для условий пластической деформации при обычной температуре, но с подстановкой в них соответствующих свойств при данной температуре (σ_{τ} , $\sigma_{\text{ст}}$) и коэффициента скоростного упрочнения $K_{\dot{\epsilon}}$, который зависит от скорости деформации прослойки и чувствительности ее металла к скорости деформации.

3. С повышением температуры изменение кратковременной деформационной способности сварного соединения связано не только с изменением пластических свойств его отдельных участков, но и с изменением коэффициента механической неоднородности, которое обусловлено различием температурных зависимостей прочностных свойств основного и мягкого металлов. Поэтому значения критических толщин прослоек, обеспечивающих активное вовлечение в деформацию основного металла и равнопрочность его с мягкой прослойкой, зависят от температуры и с ростом ее в зависимости от изменения K_T и $K_{\dot{\epsilon}}$ могут либо увеличиваться, либо уменьшаться.

4. В условиях ползучести влияние мягких прослоек на прочность и деформационную способность сварных соединений зависит от температуры и временной базы испытания и по-разному проявляется в области вязких (внутризеренных) разрушений, переходной области смешанных разрушений и в области хрупких (межзеренных) разрушений.

5. При сравнительно малой длительности испытания в области в я з к и х (внутризеренных) разрушений, сопровождаемых значительной пластической деформацией, реализуется эффект контактного упрочнения. Это приводит к увеличению сопротивления ползучести и длительной прочности прослойки. Соответственно скорость ползучести прослойки уменьшается, а время до разрушения увеличивается.

Экспериментальное исследование подтвердило, что в соответствии с предложенной ранее расчетной схемой для сварных соединений

с развитой механической неоднородностью в этой области разрушений сопротивление ползучести и длительную прочность следует оценивать по тем же формулам, что и для пластической деформации в условиях обычной температуры. При этом вместо предела текучести или временного сопротивления материала прослойки подставляются характеристики его сопротивления ползучести или длительной прочности. Экспериментально подтверждены расчетные зависимости для приближенной оценки скорости ползучести и времени до разрушения прослоек, полученные на основе степенных законов ползучести и длительной прочности с учетом эффекта контактного упрочнения.

При уменьшении степени механической неоднородности сварного соединения эффект контактного упрочнения мягкой прослойки в условиях ползучести ослабевает. Это предложено учитывать введением в расчетную формулу коэффициента реализации. Величина коэффициента реализации определяется тем же способом, что и при обычной пластической деформации, но с использованием коэффициента механической неоднородности по длительной прочности.

Для сварных соединений со сравнительно невысокой степенью механической неоднородности и при наличии подкрепляющих участков подтверждена возможность достижения равнопрочности и переноса места разрушения с прослойки на основной металл.

Деформационная способность сварных соединений в области вязких разрушений определяется относительной толщиной мягкой прослойки и изменяется, в зависимости от времени, примерно в том же темпе, что и при свободной деформации мягкого металла.

6. С увеличением температуры или временной базы и постепенным переходом от вязкого (внутризеренного) разрушения к хрупкому (межзеренному) наблюдается отклонение опытных значений длительной прочности от расчетных, полученных в предположении вязкого характера разрушения. На основе решения Л. И. Качанова предложена формула для расчетной оценки времени до разрушения мягких прослоек в области смешанных разрушений. В этой области разрушений линии длительной прочности мягкой прослойки имеют разный наклон к оси времени и чем жестче напряженное состояние (ближе к трехосному равномерному растяжению), тем больше степень охрупчива-

ния прослойки и круче линия ее длительной прочности. Показано, что в области смешанных разрушений имеется интервал времен, в котором значения длительной прочности мягких прослоек различных толщин мало отличаются между собой и по сравнению со свободно деформируемым мягким металлом. При этом, однако, их длительная пластичность отличается в несколько раз. Чем тоньше прослойка, тем меньше ее деформация до разрушения.

Снижение степени механической неоднородности сварных соединений и вовлечение в деформацию прилегающего к мягкой прослойке металла способствует уменьшению склонности к охрупчиванию.

7. При достаточно большой продолжительности испытания, когда разрушение имеет хрупкий характер, длительная прочность сварных соединений определяется величиной максимальных нормальных напряжений, которые могут в тонких мягких прослойках в 1,5-3 раза превосходить средние. Экспериментально подтверждено, что в области хрупких разрушений длительная прочность тонких мягких прослоек ниже длительной прочности свободно деформируемого мягкого металла.

8. Установленные закономерности поведения сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях ползучести подтверждаются результатами испытаний на длительную прочность реальных сварных соединений. На основе испытаний на длительную прочность под внутренним давлением трубных образцов $\phi 133 \times 10$ мм с продольным швом проведена оценка несущей способности сварных соединений паропроводов из стали марки 12Х1МФ с разупрочненным участком в зоне термического влияния. Для указанных сварных соединений предложено дифференцировать значения коэффициента прочности в зависимости от температуры эксплуатации. По предварительным данным рекомендуются следующие значения коэффициента прочности (для расчетного срока службы 100 000 часов): при температурах до 510°C - 1,0; $510-530^{\circ}\text{C}$ - 0,8; $530-550^{\circ}\text{C}$ - 0,6.

. x

x

x

Полученные в настоящей работе результаты использованы при разработке руководящих технических материалов "Конструктивно-тех-

мологическое проектирование сварных конструкций энергетических машин", которые утверждены Минтяжмаш СССР и распространяются на проектирование и изготовление сварных узлов паровых котлов и турбин, газовых турбин и вспомогательного оборудования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Об испытаниях образцов с мягкой прослойкой в условиях ползучести. "Заводская лаборатория", 1970, № 10.

2. Об оценке сопротивления и скорости ползучести при испытании образцов с мягкой прослойкой. "Заводская лаборатория", 1971, № 12.

3. Длительная прочность сварных соединений с мягкой прослойкой "Автоматическая сварка", 1972, № 2.

4. Влияние неоднородности свойств сварных соединений на их склонность к хрупким разрушениям в условиях ползучести. "Сварочное производство", 1972, № 12.

5. Влияние неоднородности сварных соединений на их прочность при высоких температурах. Сборник научных трудов "Сварные металлоконструкции и их производство", № 100, ЧПИ, 1972.

Материалы диссертации докладывались:

1) на ежегодных научно-технических конференциях ЧПИ имени Ленинского комсомола, 1970-1974 гг.;

2) на научир-технической конференции сварщиков Урала в г. Кургане, март 1971г.;

3) на научно-технической конференции сварщиков Урала в г. Ижевске, май 1972г.;

4) на научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в сварочном производстве" в г. Кургане, май 1974г.