М335875

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

ГРУДЗИНСКИЙ Болеслав Владимирович

На правах рукописи

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1978

Работа выполнена в Балашихинском ордена Ленина научно-производственном обьединении криогенного машиностроения имени 40-летия Октября.

Научный руководитель - д.т.н. доцент И.И.Макаров

Официальные оппоненты: д.т.н. профессор С.А.Куркин

к.т.н. В.Д.Прохоренко

Ведущее предприятие - Московское научно-производственное обьединение гелиевой техники (НПО "Гелиймаш").

Защита состоится "___"_____1979 г.

на заседании Совета Д.053.15.07 "Технология и машины сварочного производства"

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

[illegible]печатью,

просьба

[illegible]еке Училища.

[illegible]9 г.

[illegible].И.Стеклов

М 335875

Л-7253[illegible] [illegible]У. Заказ 1509.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Использование в технике низких температур материалов повышенной прочности позволяет значительно снизить металлоемкость конструкций и уменьшить расход криогенных сред. На XXУ сьезде КПСС снижение металлоемкости, экономия сырья и материалов были названы в числе одного из основных направлений работы по повышению эффективности промышленного производства. Одним из возможных путей повышения расчетных напряжений является использование весьма значительного упрочнения металла в условиях криогенных температур. Однако в этих условиях чувствительность сварных соединений к технологическим отклонениям (ТОСС): дефектам сварки, форме шва, резко возрастает. Поэтому использование в сварных криогенных конструкциях низкотемпературного упрочнения металла представляется достаточно сложной проблемой, тесно и неразрывно связанной с вопросами прочности сварныхсоединений с ТОСС, исследование которых имеет также важное значение в плане создания научной базы для обоснования допустимости в сварных швах технологических дефектов.

Цель и задачи работы. I. Формулирование условий возникновения разрушений в сварных криогенных конструкциях из аустенитных сталей I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6, отличающихся стабильностью аустенита, в зависимости от наличия ТОСС (непровара, пор, формы шва) и степени легирования металла шва. 2. Оценка влияния повторных термодеформационных циклов сварки (ТДЦС) при исправлении дефектов на работоспособность сварных соединений при криогенных температурах с учетом системы легирования, наличия формы шва и дефектов. 3. Получение количественных характеристик влияния ТОСС (эффективных коэффициентов концентрации напряжений) и разработка на этой основе научно обоснованных рекомендаций по допустимости дефектов при проектировании, изготовлении и контроле качества сварных криогенных конструкций. 4. Установление уровня возможного повышения расчетных напряжений в сварных соединениях с ТОСС криогенных конструкций, выполненных из сталей I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6, за счет использования низкотемпературного упрочнения металла.

Методы исследований. Для количественной оценки концентрации напряжений в сварных соединениях с ТОСС использовались решения упругих задач Г. Нейбера и обобщенная методика расчета коэффици-

МГТУ им. Н.Э.Баумана
35875
дзинский Б.В. Влияние те

ентов концентрации напряжений И.И.Макарова. Несущая способность сварных соединений при температуре -196°С оценивалась методом линейной механики разрушения и экспериментально по критерию $\sigma_{раз}$. Экспериментальные методы включали исследование прочности сварных соединений при статическом и усталостном нагружениях образцов, моделей и узлов сварных конструкций при нормальной и криогенных температурах. За критерий предельного состояния принимались: номинальное разрушающее напряжение ($\sigma_{раз}$) при статическом нагружении, предел выносливости (σ_R) при циклическом нагружении. Критерием оценки влияния ТОСС служили эффективные коэффициенты концентрации напряжений при статическом ($K_{ст}$) и циклическом (K_σ) нагружениях. Влияние повторных ТДДС оценивалось по результатам испытаний (при -196, -253°С) на ударную вязкость, статический изгиб и растяжение. Относительная степень мартенситного превращения аустенита в процессе низкотемпературной деформации определялась дискретно альфафазометром. Микроструктурный и микрофрактографический анализы осуществлялись на световом и электронном микроскопах.

Научная новизна работы состоит в установлении закономерности и условий использования эффекта низкотемпературного упрочнения сварных соединений в криогенных конструкциях в зависимости от наличия и вида ТОСС, стабильности аустенита и степени легирования основных зон (металла шва, основного металла) сварных соединений. Выявлена взаимосвязь между методом оценки критичности дефектов на основе соотношения эффективных коэффициентов концентрации напряжений от дефектов ($K^Д$) и усиления шва ($K^У$) (концепция $\alpha_д \geq \alpha_с$) и стабильностью аустенита зон сварных соединений. Показана возможность повышения низкотемпературной прочности сварных соединений путем снижения чувствительности к ТОСС. Установлено, что в условиях нулевой пластичности (Ст.3 при температуре -196°С) при оценке несущей способности сварных соединений с непроваром аналитическое решение Гросса для пластины с надрезом ($K_{Ic} = \sigma_{расч}\sqrt{\pi \ell}\, f(\ell/B)$) справедливо только для области глубоких непроваров (Нс $\gtrsim$ 30%) в связи с нелинейной зависимостью $\sigma_{расч} = f(Нс)$. Установлена неадекватность значений K_{Ic}, получаемых на образцах с непроваром и усталостной трещиной.

Практическая ценность работы. Определены в зависимости от температурных условий, характера нагружения и вида напряженного сос-

МВТУ им. Н.Э. Баумана ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ БИБЛИОТЕКА

тояния эффективные коэффициенты концентрации напряжений дифференцированно от непровара (при статическом нагружении), пор (наружных и внутренних) и формы шва с учетом влияния повторных ТДЦС; предложена методика ускоренного определения эффективных коэффициентов концентрации напряжений; рекомендованы пути снижения чувствительности сварных соединений к дефектам. Установлена степень возможного повышения расчетных напряжений при использовании упрочнения металла при температуре -196°С в сварных соединениях сталей 12Х18Н10Т, 000Х20Н16АГ6 в зависимости от наличия и вида ТОСС. Определено влияние повторных ТДЦС на свойства сварных соединений и их чувствительность к ТОСС; предложены способы исправления дефектов повторной сваркой; регламентирована допустимость исправлений дефектов с учетом системы легирования сварных соединений и температуры эксплуатации конструкций.

Реализация работы в промышленности. Практическим выходом работы являются: ОСТ-26-04-1222-75 "Изделия криогенного машиностроения. Общие технические требования" (в части требований к качеству сварных соединений), РТМ-2082-42-78 "Коэффициенты прочности сварных соединений сталей и сплавов" (в том числе при криогенной температуре), СТП-2082-327-77 "Сварка ручная аргонодуговая гермовилок и гермопроходников" (с учетом упрочнения), которые используются при проектировании и производстве криогенных конструкций.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и содержит 150 стр. текста, 90 рисунков, 28 таблиц, 6 приложений. Общий объем диссертации 239 стр. В списке литературы приведено 189 источников.

Глава I. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Основное применение в стационарных сварных криогенных конструкциях получили аустенитные стали 12Х18Н10Т, 000Х20Н16АГ6. Отличительная особенность этих сталей состоит не только в системе легирования, но главным образом в том, что аустенит стали 12Х18Н10Т нестабилен и в условиях криогенных температур может испытывать мартенситное превращение ($\gamma \rightarrow M$), а аустенит стали 000Х20Н16АГ6 стабилен во всем диапазоне криогенных температур. В связи с процессом $\gamma \rightarrow M$ стали типа 18-10 в условиях криогенных температур испытывают повышенную чувствительность к концентрации напряжений.

Повышение чувствительности аустенитных сталей к концентрации напряжений может быть также обусловлено увеличением содержания дельта-феррита (фазы с ОЦК-решеткой) и выделением при выдержке в диапазоне критических температур 500-850°С, в частности, при сварке избыточных фаз (карбидов, карбонитридов). Другая характерная особенность влияния криогенных температур заключается в высокой степени упрочнения металла. Так, с понижением температуры от +20 до -196°С предел прочности сталей 12Х18Н10Т, 000Х20Н16АГ6 повышается от 60-70 кгс/мм^2 до 120-160 кгс/мм^2. По данным испытаний круглых образцов прочность сварных соединений близка к прочности основного металла.

Эффект низкотемпературного упрочнения металла может являться значительным резервом повышения расчетных напряжений в криогенных конструкциях. Наиболее значительные исследования, посвященные изучению проблемы использования эффекта низкотемпературного упрочнения (НТУ) металла с целью повышения расчетных напряжений, были выполнены в Институте проблем прочности (Н.В.Новиков и др.) и в ИЭС им.Е.О.Патона (К.А.Ющенко и др.). Было установлено, что с учетом НТУ металла при криогенных температурах -196...-269°С расчетные напряжения могут быть повышены до 70%. Однако одновременно с повышением прочности в этих условиях резко возрастает чувствительность сварных соединений к технологическим дефектам, что не позволяет в полной мере реализовать фактор низкотемпературного упрочнения. При этом следует отметить, что присутствие дефектов в сварных швах является скорее правилом, чем исключением. По отечественным и зарубежным источникам, а также по данным автора (аустенитные стали), количество дефектных швов в среднем составляет ~ 25%. В СССР исследования по работоспособности сварных соединений с ТОСС были выполнены в МВТУ им.Н.Э.Баумана, ИЭС им.Е.О.Патона, НИАТ, ЛПИ и др. организациях (Г.А.Николаев, С.Т.Назаров, В.В.Шеверницкий, Г.В.Жемчужников, И.И.Макаров, С.В.Румянцев, Е.К.Орленков, В.И.Труфяков и др.). Из зарубежных работ известны работы Британского института сварки, Центрального института сварки в Галле и ряда исследователей Японии и США (Harrison, Kihara, Green, Ishii и др.). Перечисленные работы были выполнены главным образом на углеродистых и легированных сталях при температурах до -70°С. Исследований, посвященных изучению влияния ТОСС на прочность сварных соединений аустенитных сталей в условиях криогенных температур,

крайне недостаточно (О.А.Кудрявцев, К.А.Ющенко - ИЭС им.Патона, В.М.Муратов - НПО "Криогенмаш") для того, чтобы проблему прочности сварных соединений с ТОСС считать решенной как в дефектологическом плане, так и в аспекте использования эффекта низкотемпературного упрочнения металла в сварных криогенных конструкциях.

Глава 2. КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

Выполненный автором анализ качества сварных соединений аустенитных сталей позволил установить, что при автоматической сварке под слоем флюса основными видами дефектов являются поры (>70%) и непровар (~15%). Непровар является наиболее выраженным концентратором напряжений с радиусом кривизны до 0,001 мм. Напряженное состояние в сварных соединениях с непроваром рассматривалось в работах И.И.Макарова и Е.К.Орленкова на основе решений упругих задач о концентрации напряжений в пластине с надрезом и эллиптическим отверстием (Г. Нейбер). Было установлено, что при корневом непроваре (50%) коэффициент концентрации может достигать $\alpha_н \cong 22$.

К числу объемных концентраторов напряжений в сварных швах относятся поры. В пространственной постановке анализ напряженного состояния около объемных концентраторов в аналитической форме известен только для единичных полостей (Г.Нейбер, Tsuchida, Nakahara и др.). Однако на практике чаще встречаются группы пор. В значительной мере отсутствие аналитических решений в этом плане было восполнено экспериментальными исследованиями в упругой области на оптически активных моделях, выполненными под руководством И.И.Макарова Н.Н.Прохоровым и О.А.Луцуком. Было установлено, что в зависимости от формы, взаимного и пространственного положений коэффициенты концентрации напряжений от пор ($\alpha_п$) могут быть численно более двух. При этом распределение напряжений в зоне концентратора существенно зависит от вида напряженного состояния. На основе экспериментальных исследований и анализа аналитических решений объемных и плоских задач был сделан вывод о том, что между объемными и плоскими коэффициентами концентрации напряжений существует связь - $\alpha^{об}=0,67\alpha^{пл}$. Существование этой связи дает возможность при решении объемных задач использоать решения плоских задач.

Уровень концентрации напряжений от дефектов не является единственным показателем работоспособности сварных соединений. Сопоста-

вимая, а в ряде случаев и более высокая степень концентрации напряжений может быть обусловлена формой стыкового соединения. Это позволяет рассматривать критичность внутренних дефектов на основе сопоставления концентрации напряжений от дефектов и усиления шва (концепция $\alpha_д \geq \alpha_с$). Существует ряд методов оценки коэффициента концентрации напряжений от формы шва ($\alpha_ф$): формула Д.И. Навроцкого, Кархина-Копельмана и метод, основанный на решении Г. Нейбера. Однако все они обладают одним общим недостатком. В соответствии с этими методами при увеличении ширины шва коэффициент $\alpha_ф$ бесконечно увеличивается. Между тем было показано (И.И. Макаров), что при определенной ширине шва распределение напряжений стабилизируется и его влияние, как концентратора напряжений, становится постоянным. На этом основании был предложен новый метод расчета обобщенного коэффициента концентрации напряжений ($\alpha_с$), учитывающий не только влияние формы шва ($\alpha_ф$), но также влияние смещения кромок ($\alpha_{см}$) и наличие угловой деформации (α_γ) - $\alpha_с = \alpha_ф \cdot \alpha_{см} \cdot \alpha_\gamma$.

При известных значениях $\alpha_с$ и $\alpha_п$ можно осуществлять предварительную разбраковку сварных швов с дефектами. Коэффициент $\alpha_д$ может быть представлен по данным рентгенограмм. Однако определение коэффициента $\alpha_с$ связано с некоторыми трудностями, в основном с определением $\alpha_ф$, зависящего от параметра "ρ" (радиуса сопряжения шва с основным металлом), наиболее ответственного за концентрацию напряжений. Таким образом, при оценке коэффициента $\alpha_ф$ задача сводится к определению "ρ" в конкретных производственных условиях при сложившемся технологическом процессе сварки. В работе определение "ρ" производилось методом снятия свинцовых реплик (И.И. Макаров, В.И. Гирш, Б.В. Грудзинский), а достоверность получаемых результатов контролировалась при анализе микрошлифов. Было установлено, что при автоматической сварке под флюсом стали 12Х18Н10Т с вероятностью 0,7 значения "ρ" лежат в пределах 0,1-0,2 мм. Расчет коэффициентов $\alpha_с, \alpha_ф, \alpha_{см}, \alpha_\gamma$ на основании данных "ρ" показал, что их значения соответственно составляют 2-12; 2-3,6; 1-1,3; 1-2,7, т.е. вполне возможна ситуация, когда концентрация напряжений от усиления шва превышает концентрацию напряжений от дефектов (пор). Выполненный автором анализ разрушений сварных криогенных конструкций в процессе эксплуатации подтвердил, что фактором, преимущественно определяющим работоспособность сварных соединений, является концентрация напряжений, обусловленная формой

шва и усиливающаяся при наличии угловой деформации.

Глава 3. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ I2XI8HI0T, 000X20HI6AГ6 (влияние формы шва)

Исследовалось влияние усиления шва на прочность сварных соединений в зависимости от температурных условий, стабильности аустенита основных зон, характера нагружения и вида напряженного состояния. Критерием влияния усиления шва служили эффективные коэффициенты концентрации напряжений при статическом ($K^{y}_{ст}$) и циклическом ($K^{y}_{б}$) нагружениях.

При статическом растяжении сварных соединений стали I2XI8HI0T при температуре +20°С, а сварных соединений стали 000X20HI6AГ6 также и при температуре -I96°С, т.е. в условиях, когда сохраняется стабильность аустенита, влияние усиления шва проявляется как фактора, повышающего предел прочности сварных соединений с усилением шва ($б_{ву}$) по сравнению с пределом прочности сварных соединений без усиления шва ($б_{во}$) - $б_{во}=0,95 \div 0,85\, б_{ву}$. При этом же виде нагружения при температуре -I96°С аустенитная структура сварных соединений стали I2XI8HI0T в процессе низкотемпературной деформации испытывает мартенситное превращение. В результате чувствительность стали к концентрации напряжений возрастает. Это приводит к резкому снижению прочности сварных соединений с усилением шва: при $б^{-196}_{во} \approx 135$ кгс/мм^2 значения $б^{-196}_{ву}$ снижаются до 6I-95 кгс/мм^2, т.е. приближаются к значениям $б_{ву}$ при +20°С. Статистическая обработка экспериментальных данных позволила представить вероятность возможных значений $K^{y}_{ст}$ эмпирическим уравнением (при математическом ожидании $K^{y}_{ст}=I,5$) $P(K^{y}_{стi})=I-exp^{-(K^{y}_{стi}-I)^2/0,362}$. Таким образом, наличие усиления шва в сварных соединениях стабильноаустенитной стали 000X20HI6AГ6 повышает, а в сварных соединениях метастабильной стали I2XI8HI0T ограничивает возможность использования эффекта низкотемпературного упрочнения металла. Увеличение расчетных напряжений в этом случае возможно соответственно до 60% и 35%.

Область сопряжения шва с основным металлом, в основном ответственная за концентрацию напряжений, является переходной в смысле ее формирования. Поскольку стабильностью аустенита металла шва можно управлять через сварочную проволоку, важно было установить структурное состояние какой зоны определяет чувствительность сварных соединений к усилению шва. При сравнительной оценке

при температуре -196°С статической прочности сварных соединений сталей 12Х18Н10Т, 000Х20Н16АГ6, выполненных при использовании сварочных проволок, обеспечивавших различную стабильность аустенита шва (соответственно Св-04Х19Н9, Св-10Х16Н25АМ6 и Св-01Х19Н18Г10АМ4, Св-000Х19Н15Г6М2АВ2, Св-08МХ), было установлено, что чувствительность к усилению шва определяется стабильностью аустенита основного металла и не зависит от стабильности аустенита металла шва.

Влияние усиления шва на выносливость сварных соединений стали 12Х18Н10Т при температуре -196°С оценивалась при испытании сварных образцов сечением 600-700 мм^2 на базе $1 \cdot 10^4$-$1 \cdot 10^6$ циклов нагружения (коэффициент ассиметрии цикла $R = 0,17-0,33$, частота 5-10 гц). Долговечность сварных соединений с усилением шва по сравнению с долговечностью сварных соединений без усиления шва снижалась в 10-12 раз. Значения K^{y}_{σ} при этом составили $\sim 1,6$. На основании регрессионного анализа экспериментальных данных зависимость $\sigma_p = f(N)$ представляется уравнением $\sigma_p = 102-13,5 \lg N$ или после приведения σ_p к σ_{-1} уравнением $\sigma_{-1} = 69,3-9,7 \lg N$. Следует отметить, что значения K^{y}_{σ} сопоставимы со значениями $K^{y}_{ст}$. Это позволяет сделать вывод о том, что в первом приближении чувствительность сварных соединений к усилению шва при циклическом нагружении можно оценивать по результатам статических испытаний.

Влияние усиления шва в зависимости от вида напряженного состояния оценивалось на примере сварных соединений из Ст.3 при температуре -196°С, т.е. в упругой области, когда значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений с некоторым допущением могут рассматриваться как значения теоретических коэффициентов концентрации. Двухосному статическому изгибу подвергались сварные диски диаметром 300 мм и толщиною 12 мм при нагружении кольцевым пуансоном ($\sigma_1 = \sigma_2$). Сварные диски имели три варианта расположения швов: меридиональное, хордовое, кольцевое. Одноосному изгибу подвергались плоские сварные образцы сечением 40х12 мм. Было установлено, что при усложнении напряженного состояния, переходе от одноосного изгиба к двухосному, влияние усиления шва повышается. Если при одноосном изгибе значения $K^{y}_{ст}$ составили 1,23-1,67, то при двухосном, соответственно положению швов, - 2; 2,7; 3,6. Можно отметить, что при двухосном изгибе значения $K^{y}_{ст}$ существенно зависят от ориентации швов к направлению главных напряжений.

Поскольку максимальное значение $K_{ст}^{V}$ наблюдается при кольцевом расположении шва, на подобное конструктивное решение сварных элементов не следует ориентироваться (например, днища).

Глава 4. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ (непроваром, порами) ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 20, -196, -269°С

Известно, что работоспособность сварных соединений с ТОСС может быть оценена методом прямого эксперимента, методом, использующим аппарат линейной механики разрушения, и методом концентрации напряжений. Определение принципиальной возможности применения метода линейной механики разрушения для оценки несущей способности сварных соединений с непроваром (глубиною Нс) производилось при сопоставлении разрушающих напряжений по классическому критерию прочности $\sigma_{раз}=P/F$ и по критерию K_{Ic}, где в качестве математической модели сварного соединения с непроваром использовалось аналитическое решение Гросса для пластины с боковым надрезом – $K_{Ic}=\sigma_{расч}\sqrt{\pi \ell}\cdot f(\ell/\beta)$. Исследования проводились на примере Ст.3 при температуре -196°С, что позволило при определении коэффициента K_{Ic} использовать компактные образцы толщиною 14 мм. Значения K_{Ic} определялись при внецентренном растяжении образцов с усталостной трещиной ($K_{Ic}^{т}$) и непроваром ($K_{Ic}^{н}$). Была установлена неадекватность значений $K_{Ic}^{т}$ и $K_{Ic}^{н}$. Сопоставление $\sigma_{расч}$ и $\sigma_{раз}$ показало, что их сходимость (в большей мере при использовании коэффициента $K_{Ic}^{н}$) имеет место в области глубоких непроваров ($Нс \gtrsim 30\%$). При меньшей величине непровара наблюдается значительное расхождение $\sigma_{расч}$ от $\sigma_{раз}$, что объясняется нелинейной зависимостью $\sigma_{расч}=f(Нс)$.

Учитывая неправомерность метода линейной механики разрушения для объемных дефектов и областималых непроваров, а также трудность определения K_{Ic} для аустенитных сталей, в целях общности методологического подхода к оценке работоспособности сварных соединений с непроваром и порами было принято целесообразным в исследованиях использовать принципы метода концентрации напряжений в сочетании с методом прямого эксперимента. В связи с этим влияние непровара и пор на прочность сварных соединений оценивалось по результатам испытаний плоских сварных образцов сечением 100-700 мм^2, моделей и узлов сварных конструкций, где критерием влияния дефектов служили эффективные коэффициенты концентрации напряжений ($K_{ст}$, K_{σ}).

При криогенной температуре -196°С в отличие от нормальных

температурных условий сварные соединения сталей I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6 проявляют чувствительность к дефектам не только при циклическом, но также и при статическом нагружении, степень которой зависит от вида, топографии и пространственного положения дефектов. Так, предел прочности сварных соединений стали I2XI8HIOT при наличии непровара снижается до уровня предела прочности сварных соединений с аналогичным непроваром при температуре +20°С (в качественных сварных соединениях $\sigma_в^{+20} \approx 54$ кгс/мм^2, а $\sigma_в^{-196} \approx$ I35 кгс/мм^2). Степень чувствительности сварных соединений к непровару и порам (в-внутренним, н-наружным) может быть представлена эффективными статическими коэффициентами концентрации напряжений ($K_{ст}^{н}$, $K_{ст}^{пв}$, $K_{ст}^{пн}$). Для сварных соединений стали I2XI8HIOT (сварочная проволока Св-04XI9H9) $K_{ст}^{н}$=I,5-2,6; $K_{ст}^{пв}$=I,22-I,67; $K_{ст}^{пн}$=I,9-2,8. Для сварных соединений стали 000X20HI6AГ6 (сварочная проволока Св-000XI9HI5Г6M2AB2) $K_{ст}^{н} \approx K_{ст}^{п} \approx$ I,3. Повышенная чувствительность сварных соединений стали I2XI8HIOT к дефектам обусловлена в основном изменением структуры в процессе низкотемпературной деформации - -мартенситным превращением аустенита. Таким образом, наличие дефектов существенно ограничивает возможность использования эффекта низкотемпературного упрочнения металла в сварных соединениях, причем в сварных соединениях стали I2XI8HIOT с непроваром его реализация не представляется возможной. При наличии пористости (внутренней) с учетом упрочнения сталей I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6 при температуре -I96°С расчетные напряжения могут быть повышены соответственно до ~50% и ~25%. В исключительных случаях повышение низкотемпературной прочности (при -I96, -269°С) в сварных узлах из стали I2XI8HIOT при наличии концентратора типа непровара может быть достигнуто. Однако для этого требуется специальное конструктивно- -технологическое решение соединения, сущность которого заключается в значительном легировании металла шва никелем и в обеспечении развития трещины по легированному металлу шва.

Снижение чувствительности к непровару и порам при температуре -I96°С сварных соединений стали 000X20HI6AГ6 было получено при легировании шва аустенитообразующими элементами через сварочную проволоку Св-0IXI9HI8Г10AM4. Коэффициенты концентрации напряжений $K_{ст}^{н}$, $K_{ст}^{п}$ были снижены с ~I,3 до ~I,I. Можно считать, что при соответствующем легировании принципиально возможно создание свар-

ных соединений, нечувствительных к дефектам, как концентраторам напряжений.

При криогенной температуре критичность пор в значительной степени связана с чувствительностью сварных соединений к усилению шва. В сварных соединениях стали I2XI8HIOT, чувствительных к усилению шва как при циклическом, так и при статическом нагружении, прочность определяется соотношением концентрации напряжений от пор и усиления шва ($\alpha_c \gtrless \alpha_д$, $K^y \gtrless K^п$). Причем при усталостном нагружении влияние пор проявляется в том случае, если они существенно ослабляют сечение шва (> I0%). Следует отметить, что в сварных соединениях стали I2XI8HIOT при температуре -I96°С влияние пор, как и усиления шва, при циклическом и статическом нагружениях сопоставимо- $K^{пв}_{ст}$=I,22-I,67, $K^{п}_{б}$=I,6-I,7. Это указывает на возможность оценки в первом приближении чувствительности сварных соединений к порам при циклическом нагружении по результатам статических испытаний. В сварных соединениях стали 000Х20НI6АГ6, нечувствительных к усилению шва при статическом нагружении и температуре -I96°С, прочность определяется только влиянием пор, что объясняется различием в структуре металла шва и зоны сопряжения (см. гл.3).

Анализ статической прочности сварных соединений сталей I2XI8HIOT, 000Х20НI6АГ6 в зависимости от величины непровара и пористости показал, что при некоторой "критической" величине дефектов (непровар >5-7%, пористость >0,3-0,4%) наблюдается резкий излом кривых. Если в докритической области снижение прочности сварных соединений происходит наиболее интенсивно, и влияние дефектов преимущественно проявляется как концентраторов напряжений, то в закритической области эффект концентрации напряжений становится постоянным и снижение прочности происходит монотонно за счет ослабления сечения шва. Учитывая работы И.И.Макарова, В.С.Ивановой, можно сделать вывод о существовании в закритической области закономерности постоянства эффекта концентрации напряжений ($K_{ст}$-const). Эта закономерность имеет практическое применение. Поскольку критическая величина дефектов незначительна, в практике можно считать $K_{ст}$-const во всем диапазоне значений дефектов (непровара, пор). Это упрощает задачу расчета на прочность сварных соединений с учетом наличия дефектов. При определении коэффициентов $K_{ст}$ отпадает необходимость проведения испытаний для всего диапазона возмож-

ных величин дефектов. В этом случае достаточно проведения испытаний при одной закритической величине дефекта. Можно также сделать вывод о возможности увеличения допустимости единичных ($\ell > 3\alpha$) дефектов (пор) в сварных соединениях без снижения их работоспособности.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНЫХ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ СВАРКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6

В общем случае при исправлении дефектов повторной сваркой (подваркой) сварное соединение представляется состоящим из трех наиболее характерных зон, отличающихся предисторией металла и условиями термодеформационной обработки (ТДО): основного металла, подвергающегося ТДО критическими температурами карбидообразования (~ 500-$850^{\circ}C$) при выполнении основного и подварочных швов; основного шва, подвергающегося ТДО критическими температурами со стороны подварочных швов; подварочных швов.

Микроструктурные исследования характерных зон сварных соединений после подварки показали, что наиболее существенные структурные изменения (выделение карбидов хрома) происходят в основном шве стали I2XI8HIOT. В результате ударная вязкость этой зоны при температуре $-196^{\circ}C$ в зависимости от количества повторных ТДЦС и применяемой сварочной проволоки (Св-04XI9H9, Св-0IXI9HI8ГIOAM4) снижается с I0-8 кгс.м/см^2 до 2,9 кгс.м/см^2, а в некоторых случаях до 0,8 кгс.м/см^2. Интенсивности снижения ударной вязкости шва способствует повышение содержания дельта-феррита в основном металле, что подтверждает данные К. А. Ющенко и др., полученные на высоколегированных сталях типа Fe-Cч-Ni-Мп-N. В зоне основного металла также наблюдается монотонное снижение ударной вязкости, однако и после 4-кратной подварки ее величина ($\sim$I5 кгс.м/см^2) превышает величину ударной вязкости основного шва в исходном состоянии. Важно отметить, что ударная вязкость подварочных швов практически не зависит от их количества и сохраняется на уровне ударной вязкости основного шва в исходном состоянии.

В сварных соединениях стали 000X20HI6AГ6 при подварке в относительно наибольшей степени при температуре $-196^{\circ}C$ снижение ударной вязкости наблюдается в зоне основного металла, но она также сохраняется на достаточно высоком уровне (после 4-кратной подварки-с 23 кгс.м/см^2 до I3 кгс.м/см^2), что согласуется с результатами

исследований Н.И.Каховского, К.А.Ющенко, Г.Г.Монько. Вязкость основного и подварочных швов при температурах -196, -253°С после 2-4--кратной подварки снижается в меньшей степени - на 20-30%, что обусловлено, по-видимому, особенностями легирования металла шва.

На основании результатов сравнительных испытаний сварных соединений сталей I2XI8HIOT, 0C0X20HI6AГ6, прошедших термическую (электронагревом) и термодеформационную обработку при подварке, было установлено, что комплекс термодеформационной обработки на 20-30% более эффективно снижает ударную вязкость металла шва при температуре -196°С, чем только термическая обработка. Это указывает на неэквивалентность рассмотренных методов оценки реакции сварных соединений на повторные ТДЦС. Интересно в то же время отметить, что весьма кратковременной (в течение I,5 минуты) термической обработки температурой аустенизации (960°С) было достаточно, чтобы ударная вязкость металла шва повысилась на 30-40%.

То обстоятельство, что степень изменения вязкости характерных зон сварных соединений при подварке существенно различна, может быть использовано с целью уменьшения отрицательных последствий сварочных нагревов. Если при подварке рассматривать три характерные зоны, то, очевидно, важно, чтобы после подварки свойства сварных соединений в целом были не ниже свойств металла шва в исходном состоянии. Такое условие может осуществлено, если при подварке область критических температур смещать на основной металл, сохраняющий достаточно высокую степень вязкости. В односторонних сварных соединениях это достигается полным (или близким к полному) расплавлением основного шва подварочным. В двухсторонних сварных соединениях исправление дефектов повторной сваркой следует производить со стороны первого шва, что уменьшает время пребывания металла первого шва в диапазоне критических температур.

Оценка влияния повторных ТДЦС на пластичность сварных соединений производилась по результатам испытаний сварных образцов с характерными зонами на статический изгиб при температуре -196°С. Было установлено, что в зависимости от количества повторных ТДЦС угол изгиба сварных соединений сталей I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6 (после 4-кратной подварки) снижается соответственно в 3 и 6 раз (при I80° в исходном состоянии). Причем влияние повторных ТДЦС может быть более значительным, чем влияние дефектов. Учитывая высокую чувстви-

гельность метода и отсутствие необходимости в определении зоны максимального охрупчивания, он может быть предложен для относительной оценки реакции сварных соединений к повторным сварочным нагревам.

В практике возможны случаи, когда ТДО критическими температурами подвергаются дефекты и зона сопряжения шва с основным металлом. В связи с этим было исследовано влияние повторных ТДЦС на изменение чувствительности сварных соединений стали I2XI8HIOT к усилению шва и дефектам при статическом нагружении и температуре -I96°С. Было установлено, что в зависимости от количества повторных ТДЦС чувствительность сварных соединений к усилению шва и дефектам возрастает на 20-30% (после 2-4-кратной подварки). Это ограничивает возможность использования низкотемпературного упрочнения металла, а допустимые дефекты может перевести в категорию недопустимых.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено: сварные соединения аустенитных сталей (I2XI8HIOT, 000X20HI6AГ6) при криогенных температурах, в отличие от нормальных температурных условий, проявляют чувствительность к технологическим отклонениям (дефектам сварки, усилению шва), как концентраторам напряжений, не только при циклическом, но и при статическом нагружении, что не позволяет в полной мере использовать при проектировании и изготовлении сварных криогенных конструкций эффект низкотемпературного упрочнения металла.

2. Степень чувствительности сварных соединений к технологическим отклонениям при температуре -I96°С зависит от характера нагружения, топографии дефектов, от стабильности аустенита металла шва и основного металла. Снижение чувствительности к концентраторам-дефектам, обусловленной стабильностью аустенита, может быть осуществлено легированием металла шва аустенитообразующими элементами (в основном никелем).

3. Установлено, что при температуре -I96°С влияние ТОСС (пор, усиления шва) на прочность сварных соединений стали I2XI8HIOT при статическом и циклическом нагружениях сопоставимо ($K_{ст} \cong K_{б}$). Это позволяет оценивать чувствительность к ТОСС сварных соединений, работающих при циклическом нагружении, по результатам статических испытаний.

4. Влияние внешнего концентратора напряжений (усиления шва) на статическую прочность сварных соединений при температуре -196°С обусловлено стабильностью аустенита основного металла и не зависит от стабильности аустенита металла шва, в связи с чем усиление шва является фактором, повышающим прочность в сварных соединениях стабильноаустенитной стали 000Х20Н16АГ6 (~ 10-20%), и фактором, снижающим прочность сварных соединений метастабильной стали 12Х18Н10Т (в 1,5-2 раза), по сравнению с прочностью сварных соединений без усиления шва.

5. Сравнительная оценка разрушающих напряжений в сварных соединениях Ст.3 при температуре -196°С с непроваром по классическому критерию прочности $\sigma_{раз}$ и критерию K_{Ic} ($\sigma_{расч}$) показала идентичность указанных критериев для оценки несущей способности сварных соединений с глубоким непроваром (Нс $\geq$ 30%). При меньшей величине непровара наблюдается значительное различие $\sigma_{расч}$ от $\sigma_{раз}$, обусловленное ограниченными возможностями метода линейной механики разрушения (в частности, модели Гросса), применяемого для оценки несущей способности сварных соединений с непроваром и другими дефектами.

6. Установлено, что при криогенной температуре и статическом нагружении в области с закритической величиной дефектов (непровар > 5-7%, пористость > 0,3-0,4%) существует закономерность, заключающаяся в постоянстве эффекта концентрации напряжений ($K_{ст}$-const), что позволило предложить методику ускоренного определения эффективных коэффициентов концентрации напряжений и показать возможность увеличения допустимости единичных дефектов (без снижения работоспособности сварных соединений).

7. Термодеформационная обработка металла в процессе исправления дефектов повторной сваркой сопровождается снижением вязкости, пластичности, а при наличии ТОСС (дефектов, усиления шва), и прочности сварных соединений сталей 12Х18Н10Т, 000Х20Н16АГ6 при криогенных температурах. Степень изменения свойств характерных зон сварных соединений различна и обусловлена системой легирования, количеством повторных ТДЦС и содержанием дельта-феррита. Полученные результаты позволили сформулировать условия, при которых повторный сварочный нагрев металла при исправлении дефектных участков шва может вызвать переход допустимых дефектов в категорию недопустимых и уси-

лить влияние формы шва, как концентратора напряжений. На этом основании предложен метод исправления дефектов, позволяющий уменьшить отрицательные последствия повторных сварочных нагревов на механические свойства сварных соединений при криогенных температурах.

8. По результатам исследований прочности сварных соединений сталей I2XI8НIOТ, 000X20НI6АГ6 с ТОСС при статическом и циклическом нагружениях и температуре -I96°С рассчитаны эффективные коэффициенты концентрации напряжений и даны рекомендации по составлению руководящих материалов по допустимости дефектов в сварных швах криогенных конструкций.

9. Выполненный комплекс исследований позволил установить, что при использовании упрочнения металла при температуре -I96°С с учетом влияния ТОСС и повторных ТДЦС, расчетные напряжения в сварных соединениях статически нагруженных криогенных конструкциях из сталей I2XI8НIOТ, 000X20НI6АГ6 могут быть повышены до ~30%, по сравнению с расчетными напряжениями, определенными без учета эффекта низкотемпературного упрочнения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Грудзинский Б.В., Степанов Г.А., Яцков А.П., Скольцов В.И. Влияние непровара на прочность сварных соединений стали I2XI8НIOТ при криогенной температуре. -Сварочное производство, I973, № I2.

2. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Влияние термодеформационного цикла сварки на пластичность металла шва на аустенитных сталях. -Автоматическая сварка, I975, № 9.

3. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Влияние непровара на статическую прочность сварных соединений при криогенной температуре. -Сварочное производство, I976, № I.

4. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Устройство для захвата плоских образцов при испытании на растяжение. -Авт. св. № 5I3294.

5. Макаров И.И., Грудзинский Б.В. Влияние концентраторов напряжений на статическую прочность сварных соединений сталей I2XI8НIOТ, 000X20НI6АГ6, Ст.3 при криогенной температуре. -Автоматическая сварка, I977, № 8.

Материалы диссертации докладывались на научном семинаре сварщиков в МВТУ им. Н.Э. Баумана, I4 ноября I977 г.