

М 384625

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

НЕЦВЕТАЕВ Виктор Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
СРЕДЫ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ
ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ЛАМЕЛЯРНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

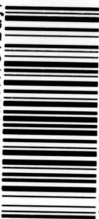
НЕЦВЕТАЕВ Виктор Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
СРЕДЫ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ
ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ЛАМЕЛЯРНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1387625

Нецветаев В. А. Исследования



Работа выполнена в Иркутском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Матханов В.Н.

Официальные оппоненты - д.т.н., проф. Стеклов О.И.
к.т.н., с.н.с. Симоник А.Г.

Ведущее предприятие - Иркутский завод тяжелого машиностроения имени В.В.Куйбышева

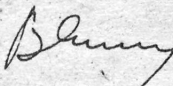
Защита диссертации состоится "___" _____ 198__ г.
на заседании специализированного Совета К.053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Автореферат разослан "___" _____ 198__ г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
д.т.н.



ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Л-86913 от 30.12.81. Объем I п.л. Зак. 1659 Тир. 100 экз.
Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В соответствии с решениями XXVI съезда КПСС в настоящее время в северо-восточных районах нашей страны и, в частности, в зоне Байкало-Амурской магистрали ведется большое капитальное строительство. Холодный климат этих районов и необходимость вести строительство круглогодично являются причинами, по которым значительный объем сварочных работ выполняется при отрицательных температурах окружающего воздуха, достигающих минус 50°C и ниже.

При изготовлении конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях отрицательных температур, широкое применение находят низколегированные стали 10ХСНД, 10Г2С1, 17ГС. Практический опыт показал, что сварка этих сталей при отрицательных температурах в ряде случаев приводит к появлению холодных ламелярных трещин.

Ламелярные трещины являются одними из наиболее опасных типов трещин, так как из-за преимущественной ориентации параллельно плоскости листа они часто не выходят на поверхность, остаются необнаруженными и создают опасность хрупкого разрушения конструкций при ее эксплуатации.

До настоящего времени природа и механизм образования холодных ламелярных трещин окончательно не установлены, данные о влиянии отрицательной температуры среды на их образование при сварке отсутствуют, что затрудняет борьбу с ними. Исследование этих вопросов является актуальной задачей, решение которой отвечает интересам строительства в районах Сибири и Севера.

Целью работы является повышение сопротивляемости низколегированных сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур.

Методы исследования. Оценку сопротивляемости сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур проводили по методике, разработанной на основе использования метода ЛТП-2. Контроль за термическим циклом сварки металла околошовной зоны осуществляли с помощью осциллографирования температуры. Для изучения механизма образования холодных ламелярных трещин, их связи с неметаллическими включениями, а также для определения влияния отрицательной температуры среды при сварке на структуру сварных соединений применяли метал-

лографические методы исследований. Влияние отрицательной температуры на механические свойства сварных соединений оценивали испытаниями на растяжение и ударный изгиб образцов, вырезанных из соединений в плоскости листа и в направлении его толщины. Содержание диффузионного водорода в швах тавровых образцов определяли по методике, разработанной с использованием метода спиртовых эвдиометров. Его перераспределение после сварки рассчитывали численным методом на ЭВМ по программе "ЛП-2 Водород".

Научная новизна работы. 1. Установлено, что изменение структуры и понижение пластических свойств зоны термического влияния низколегированных сталей не являются основными причинами снижения сопротивляемости холодным ламелярным трещинам при понижении температуры в отрицательную область, а главным фактором, снижающим сопротивляемость трещинам, является водород, насыщающий соединения при сварке.

2. Установлено, что минимальная сопротивляемость холодным ламелярным трещинам при сварке низколегированных сталей соответствует температуре минус 15⁰С, что объясняется повышенным насыщением швов водородом и его пониженной диффузионной подвижностью при этой температуре. Последняя недостаточна для интенсивного удаления водорода из сварного соединения, но достаточна для накопления в околошовной зоне и ее охрупчивания.

Практическая ценность работы заключается в разработке рекомендаций по определению режима подогрева, предотвращающего образование холодных ламелярных трещин при сварке низколегированных сталей в условиях отрицательных температур. Разработанные рекомендации внедрены в производственном объединении "Ангарскнефтеоргсинтез" с фактическим экономическим эффектом 22,3 тыс. рублей в год.

Апробация. Основные положения работы докладывались на:

- Всесоюзных научно-технических конференциях по проблемам хладостойкости материалов, г. Якутск, 1974, 1978 г.г.;
- городском научном семинаре сварщиков, г. Москва, МВТУ имени Н.Э.Баумана, 1979 г.;
- конференциях НТО Машпром "Передовые способы сварки и наплавки", г. Иркутск, 1974, 1976 г.г.;
- IU отраслевой научно-технической конференции "Прогрессивные методы сварки и резки при изготовлении и ремонте нефтехимического оборудования", г. Ангарск, 1978 г.;

- Всесоюзной конференции, посвященной 50-летию подготовки инженеров-сварщиков, г. Владивосток, 1980 г.;
- научно-технических конференциях Иркутского политехнического института, 1975-1981 г.г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов по работе. Содержит 4 таблицы, 63 рисунка, I приложение и 122 наименования использованных литературных источников, изложена на 133 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены природа холодных ламелярных трещин и условия их образования, поставлены цель и задачи исследования.

Холодные ламелярные трещины или слоистое растрескивание представляют собой ориентированные по слоям прокатки локальные разрушения сварных соединений без следов высокотемпературного окисления поверхностей разрушения. Изучению холодных ламелярных трещин посвящены работы Эллиота Д.Н., Никольса Д.М., Феррара Ж., Нисио У., Каназава С., Оутиса Р.Д., Ломбардини Ю., Шалимова Ю.А., Макарова Э.Л. и др.

По мнению большинства исследователей основными условиями появления ламелярных трещин в соединениях являются остаточные сварочные напряжения в направлении толщины прокатанного металла в сочетании с его низкими механическими свойствами в этом направлении. Их образование рассматривают как механическое разрушение при пониженных напряжениях, обусловленное наличием в металле плоских неметаллических включений.

Однако не все авторы придерживаются изложенных взглядов на природу и условия образования холодных ламелярных трещин полностью. Нисио У., Гарланд Ж., Шалимов Ю.А. и Макаров Э.Л. высказывают предположение о возможности образования холодных ламелярных трещин в околосварной зоне соединений по механизму замедленного разрушения.

Отдельные исследователи считают воздействие термомеханического сварочного цикла на металл одним из условий появления ламелярных трещин. В частности, Феррар Ж. и Ломбардини Ю. рассматривают закалку металла при сварке как процесс, охрупчивающий матрицу и способствующий образованию ламелярных трещин.

Относительно роли водорода в образовании холодных ламеляр-

ных трещин мнения расходятся. Драри М.Л., Бетц И. и Льюнг Х. считают, что водород оказывает незначительное влияние на их образование. Напротив, в работах Нисно У., Каназава С., Шалимова Ю.А. и Макарова Э.Д. показана существенная роль водорода в образовании ламелярных трещин.

Установлено, что сопротивляемость сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке зависит от ряда металлургических факторов (химический состав стали, форма, состав, количество и распределение неметаллических включений), конструктивных (толщина проката, тип соединения, жесткость конструкции) и технологических (прочность металла шва, режим и порядок сварки, подогрев, термическая обработка и др.). Данных о влиянии отрицательной температуры среды на сопротивляемость сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке в литературе нет.

Проведенный анализ литературных данных позволяет сформулировать задачи работы следующим образом:

1. Исследование влияния отрицательной температуры окружающего воздуха на сопротивляемость низколегированных сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке.
2. Исследование причин влияния отрицательной температуры окружающего воздуха на образование холодных ламелярных трещин при сварке.
3. Исследование природы холодных ламелярных трещин.
4. Разработка практических рекомендаций по повышению сопротивляемости сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур.

Глава вторая посвящена исследованию влияния отрицательной температуры среды на сопротивляемость низколегированных сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке. Она содержит анализ методов оценки сопротивляемости сталей ламелярным трещинам при сварке, разработку методики определения сопротивляемости соединений ламелярным трещинам при отрицательной температуре среды при сварке и полученные по этой методике экспериментальные данные.

В результате проведенного анализа для выполнения экспериментов был выбран метод ЛТП-2 МВТУ им. Н.Э.Баумана. В соответствии с разработанной на его основе методикой гавровые образцы собирали и сваривали в приспособлении, воспроизводящем условия охлаждения металла при сварке реальных конструкций. После свар-

ки образцы выдерживали под постоянной нагрузкой не менее 20 часов на машине ЛТП-2-3. Сварку при температуре до минус 35°C проводили в естественных условиях, при температуре минус 70°C применяли охлаждение твердой углекислотой. В процессе испытаний температуру образцов поддерживали постоянной с помощью холодильной камеры, установленной на испытательной машине. Сопротивляемость трещинам оценивали величиной минимальных напряжений, вызывающих их появление.

В образцах из исследуемых сталей IOГ2СІ и IOХСНД трещины имели слоистую форму, характерную для ламеллярных трещин. Они зарождались в околошовной зоне соединений и распространялись вглубь основного металла.

При сварке электродами УОНИ ІЗ/55 в состоянии поставки сталь IOГ2СІ показала достаточно высокую сопротивляемость образованию ламеллярных трещин 600 Н/мм² при температуре среды в процессе сварки и испытания плюс 20°C (рис. 1). При снижении температуры среды от плюс 20°C до минус 15°C происходит уменьшение ее сопротивляемости образованию ламеллярных трещин до минимального значения 450 Н/мм². При дальнейшем понижении температуры среды до минус 70°C сопротивляемость возрастает до значения 320 Н/мм².

Сталь IOХСНД при всех исследованных температурах имеет сопротивляемость образованию ламеллярных трещин при сварке выше, чем сталь IOГ2СІ. Характер изменения ее сопротивляемости ламеллярным трещинам аналогичен характеру изменения сопротивляемости стали IOГ2СІ.

Проведенные исследования показали, что сопротивляемость низколегированных сталей ламеллярным трещинам с понижением температуры среды при сварке изменяется по кривой с минимумом, соответствующим температуре минус 15°C.

Глава третья посвящена исследованию причин влияния отрицательной температуры среды на образование холодных ламеллярных трещин при сварке.

Работами Олифиренко К.М. и Вологодина В.П., Гололобова Б.А. и Николаева К.Г., Полузьяна А.А. и Мазеля А.Г. и др. показано, что сварка при отрицательной температуре имеет ряд особенностей, обусловленных воздействием температуры на свойства металла сварных соединений и на протекание физических процессов при сварке. Проведенный анализ позволил выделить в качестве вероятных причин влияния отрицательной температуры среды на образование ла-

мелярных трещин при сварке следующие особенности:

- изменение механических свойств металла в направлении толщины листа под воздействием отрицательной температуры;
- образование более твердых и хрупких структур в околошовной зоне соединений вследствие повышения скорости охлаждения в интервале температур распада аустенита;
- повышение концентрации водорода в соединениях и снижение его диффузионной подвижности.

Влияние температуры и анизотропии сталей на механические свойства сварных соединений оценивали стандартными испытаниями на растяжение и ударный изгиб при температурах от плюс 20°C до минус 70°C. Круглые образцы диаметром 6 мм для испытаний на растяжение и призматические сечением 5x10 мм с треугольным надре-зом для испытаний на ударный изгиб вырезали в плоскости листа и в направлении его толщины из крестовых сварных заготовок.

Испытания при температуре плюс 20°C показали, что при пере-ходе от образцов, вырезанных в плоскости листа, к образцам, вы-резанным в направлении его толщины, предел прочности уменьшает-ся на 12,2 % у стали ЮГ2СІ и на 10,7 % у стали ЮХСНД, относи-тельное сужение падает на 86 % и 87 %, а ударная вязкость на 78 % и 67,8 % соответственно. Установленные пониженная проч-ность и низкая пластичность сталей в направлении толщины листа говорят об их потенциальной склонности к образованию ламелярных трещин при сварке.

Проведенные металлографические исследования выявили в обе-их сталях наличие плоских параллельных поверхности листа суль-фидов и силикатов. Их влиянием можно объяснить полученную зна-чительную анизотропию механических свойств. В стали ЮГ2СІ включений содержится больше, что предопределяет ее пониженную по сравнению со сталью ЮХСНД сопротивляемость ламелярным тре-щинам.

Прочность образцов из обеих сталей, вырезанных в плоскости листа, при понижении температуры повышается с одновременным по-нижением относительного сужения и ударной вязкости, что согла-суется с данными других авторов. При понижении температуры от плюс 20°C до минус 70°C происходит повышение предела прочности в направлении толщины листа на 14-15 %. Несоответствие в харак-тере изменения прочности в направлении толщины листа и сопро-тивляемости образованию холодных ламелярных трещин при пониже-

нии температуры говорит о том, что образование ламелярных трещин при сварке нельзя рассматривать как обычное механическое разрушение.

Обе стали имеют в направлении толщины листа низкие значения относительного сужения и ударной вязкости при температуре плюс 20°C , при ее понижении до минус 70°C относительное сужение практически не изменяется, а ударная вязкость снижается незначительно. Установленные незначительные изменения механических свойств металла в направлении толщины позволяют сделать вывод, что они не являются причиной снижения сопротивляемости ламелярным трещинам при понижении температуры в отрицательную область.

При температуре среды при сварке плюс 20°C , минус 20°C и минус 70°C скорость охлаждения в интервале температур $450-550^{\circ}\text{C}$ в околошовной зоне тавровых образцов составляет $10,0^{\circ}\text{C}/\text{с}$, $12,6^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и $15,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При этом существенной разницы в структуре не обнаружено. В соединениях из обеих сталей при понижении температуры среды при сварке наибольшее повышение твердости происходит на участке перегрева, оно составляет $10-10,2\%$ при температуре минус 20°C и $23-24\%$ при температуре минус 70°C .

Проведенные эксперименты показали, что структура и пониженные пластические свойства зоны термического влияния низколегированных сталей не являются причинами снижения сопротивляемости ламелярным трещинам при понижении температуры в отрицательную область, поскольку при этом не фиксируется существенных их изменений.

Глава четвертая посвящена исследованию влияния водорода на сопротивляемость низколегированных сталей образованию холодных ламелярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур.

В работах Фролова В.В., Петрова Г.Л., Козлова Р.А., Походни И.К., Макарова Э.Л. и др. показано, что водород охрупчивает металл сварных соединений и способствует образованию холодных трещин. Отмечается решающая роль диффузионного водорода в охрупчивании сварных соединений в связи с его высокой подвижностью и способностью накапливаться в определенных локальных областях металла.

При испытаниях по методу ЛТП-2 изменяли степень насыщения швов водородом за счет применения электродов УОНИ 13/55 в состоянии поставки и после прокатки при температурах $300-320^{\circ}\text{C}$ и $480-$

500°C. Для определения содержания диффузионного водорода в швах тавровых образцов использовали метод спиртовых эвидиметров. В соответствии с разработанной на его основе методикой полки и стенки тавровых образцов изготавливали составными. После сварки центральную часть образца со швом охлаждали в воде и помещали в эвидиметр со спиртом. Концентрацию водорода определяли в расчете на 100 г металла шва.

Испитания показали, что повышение содержания водорода сказывается в максимальной степени на сопротивляемости ламелярным трещинам при температуре среды минус 15°C. При этой температуре увеличение содержания водорода в шве от 1 до 7 см³/100 г вызвало снижение сопротивляемости ламелярным трещинам на 43 % у стали 10Г2С1 и на 32 % у стали 10ХСНД. При температуре плюс 20°C влияние повышения содержания водорода менее ощутимо, а при температуре минус 70°C оно практически не сказывается на сопротивляемости сталей ламелярным трещинам.

С целью определения влияния отрицательной температуры на содержание водорода в околошовной зоне, где происходит образование холодных ламелярных трещин, производили расчет его перераспределения после сварки численным методом на машине ЕС-1033 по программе "ЛТП-2 Водород", разработанной в МВТУ им. Н.Э.Баумана Макаровым Э.Л. и Егоровым Н.И. В соответствии с программой содержание водорода в точках соединения определяется уравнением 2-го закона Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D \delta \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

где C - концентрация водорода; t - время; y, z - координаты; T - температура; D - коэффициент диффузии водорода; δ - термोगradientный коэффициент.

Расчет показал, что после сварки при температуре плюс 20°C развиваются процессы перераспределения и удаления водорода в атмосферу, в результате которых снижается и выравнивается его концентрация в соединениях. При понижении температуры до минус 15°C и ниже указанные процессы замедляются, повышенное содержание водорода и неравномерность его распределения сохраняются в течение длительного времени.

Влияние снижения температуры среды при сварке на содержание водорода в околошовной зоне соединений на расстоянии 1 мм от линии сплавления поясняет график на рис. 2, где кривая начального

содержания водорода в шве получена экспериментально, а коэффициент диффузии водорода и его содержание в околошовной зоне определены расчетным путем. Содержание водорода определялось к моменту времени 12 часов после сварки, когда наблюдается минимальное сопротивление зоны трещинам.

С понижением температуры окружающей среды при сварке развиваются процессы, способствующие насыщению околошовной зоны водородом:

- увеличивается содержание водорода в металле шва (рис. 2), что способствует большему переходу его в околошовную зону;
- снижается диффузионная подвижность водорода (рис. 2), что замедляет его удаление из шва и околошовной зоны в атмосферу, а также из околошовной зоны в основной металл.

При температуре минус 15°C удаление водорода из сварного соединения в атмосферу и основной металл замедлено, но его подвижности еще достаточно для диффузии из шва в околошовную зону. По этим причинам при температуре минус 15°C концентрация водорода в околошовной зоне максимальная (рис. 2). С дальнейшим понижением температуры содержание водорода в околошовной зоне снижается, так как его поступление из шва начинает ограничиваться из-за уменьшения его диффузионной подвижности.

Зависимости содержания водорода в околошовной зоне и сопротивляемости низколегированных сталей холодным ламелярным трещинам от температуры среды при сварке соотносятся таким образом, что на одних и тех же температурных участках повышению содержания водорода соответствует понижение сопротивляемости ламелярным трещинам. Температуре минус 15°C , при которой содержание водорода в околошовной зоне максимальное, соответствует минимальная сопротивляемость сварных соединений ламелярным трещинам.

Проведенными экспериментами и расчетом установлено, что главной причиной снижения сопротивляемости низколегированных сталей ламелярным трещинам при понижении температуры в отрицательную область является водород.

Показано, что минимальная сопротивляемость сталей холодным ламелярным трещинам при температуре минус 15°C объясняется повышенным насыщением швов водородом и его пониженной диффузионной подвижностью при этой температуре. Последняя недостаточна для интенсивного удаления водорода из сварных соединений, но достаточна для накопления в околошовной зоне и ее охрупчивания.

Глава пятая посвящена изучению природы холодных ламеллярных трещин и разработке практических рекомендаций по повышению сопротивляемости низколегированных сталей их образованию при сварке в условиях отрицательных температур. Экспериментальным путем установлено, что образование холодных ламеллярных трещин носит замедленный характер. При испытаниях стали ЮГ2СИ при температуре минус 15°C трещины появлялись через 12–15 часов действия минимальных разрушающих напряжений. Показано, что "отдых" положительно влияет на сопротивляемость металла ламеллярным трещинам. При понижении температуры среды до минус 70°C образование ламеллярных трещин подавляется и восстанавливается при последующем отогреве до плюс 20°C . С увеличением скорости отогрева сопротивляемость ламеллярным трещинам повышается.

Металлографические исследования показали, что ламеллярные трещины зарождаются на участке перегрева от плоских неметаллических включений и при распространении имеют транскристаллический характер.

Установленные закономерности образования холодных ламеллярных трещин объяснены с учетом водородного охрупчивания металла. Водород, диффундирующий после сварки в околошовную зону, способствует как расщеплению включений с матрицей, что приводит к образованию очагов ламеллярных трещин, так и развитию трещин за счет охрупчивания матрицы и снижения ее сопротивляемости разрушению. Термодеформационный цикл сварки, воздействие которого может приводить к охрупчиванию матрицы, также способствует образованию ламеллярных трещин.

Замедленное образование ламеллярных трещин обусловлено тем, что для диффузии водорода в околошовную зону и к неметаллическим включениям требуется определенное время. Положительное влияние "отдыха" связано с удалением водорода из соединений до начала нагружения, а влияние скорости отогрева от минус 70°C до плюс 20°C – с различным временем пребывания при температурах, близких значению минус 15°C .

С целью предотвращения образования холодных ламеллярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур рекомендуется проводить предварительный и последующий подогрев. Расчет на ЭМ с использованием программы "ДТП-2 Водород" определены режимы подогрева, снижающего содержание водорода в околошовной зоне до его уровня, соответствующего температуре плюс 20°C , и пре-

дотвращающего образование холодных ламелярных трещин при сварке в условиях отрицательных температур. Так, в случае сварки при температуре воздуха минус 15-20°C узлов из стали 10Г2С1 толщиной 16 мм электродами УОНИ 13/55, прокаленными при температуре 400-450°C, рекомендуемая температура предварительного и последующего подогрева составляет 100-120°C при длительности последующего подогрева 2 часа. Практика подтвердила правильность указанной рекомендации.

Результаты внедрения разработанных рекомендаций отражены в общих выводах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ практического опыта и проведенные исследования показали, что низкоуглеродистые низколегированные стали типа 10ХСНД и 10Г2С1 обладают склонностью к образованию холодных ламелярных трещин при сварке, которая особенно проявляется при отрицательных температурах.

2. Установлено, что структура и пониженные пластические свойства зоны термического влияния низколегированных сталей не являются основными причинами снижения сопротивляемости холодным ламелярным трещинам при понижении температуры в отрицательную область, а главным фактором, снижающим сопротивляемость трещинам, является водород, насыщающий соединения при сварке.

3. Установлено, что образование холодных ламелярных трещин представляет собой замедленное разрушение наводороженного и частично закаленного металла околосшовной зоны сварных соединений под действием ориентированных в направлении толщины листа остаточных сварочных напряжений. Трещины зарождаются на поверхности раздела металлической матрицы и плоских неметаллических включений.

4. Показано, что после сварки при температуре плюс 20°C развиваются процессы перераспределения и удаления водорода в атмосферу, в результате которых снижается и выравнивается его концентрация в соединениях. При понижении температуры до минус 15°C и ниже указанные процессы замедляются, повышенное содержание водорода и неравномерность его распределения сохраняются в течение длительного времени.

5. Установлено, что минимальная сопротивляемость холодным ламелярным трещинам при сварке низколегированных сталей соответ-

ствует температуре минус 15°C , что объясняется повышенным насыщением швов водородом и его пониженной диффузионной подвижностью при этой температуре. Последняя недостаточна для интенсивного удаления водорода из сварного соединения, но достаточна для накопления в околошовной зоне и ее охрупчивания.

6. При сварке при температуре окружающей среды минус 70°C фиксируется практическое отсутствие склонности сталей к образованию трещин, которая восстанавливается при нагреве до нормальной температуры. Для предупреждения интенсивного трещинообразования при нагреве его скорость в интервале температур минус $30-0^{\circ}\text{C}$ не должна быть менее $50^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

7. Разработаны практические рекомендации по определению режима подогрева при сварке низколегированных сталей в условиях отрицательных температур, снижающего содержание водорода в околошовной зоне соединений до уровня, соответствующего температуре среды плюс 20°C , и предотвращающего образование холодных ламинарных трещин.

8. Разработанные рекомендации внедрены в производственном объединении "Ангарскиефтеоргсинтез" при сварке в условиях отрицательных температур узлов нефтехимического оборудования из низколегированных сталей с фактическим экономическим эффектом 22,3 тыс. рублей в год.

Содержание диссертации отражено в работах:

1. Матханов В.Н., Нецветаев В.А., Ганно Н.А. Исследование сопротивляемости низколегированных сталей образованию холодных трещин при сварке в зимних условиях по методике ЛТП-2. - В сб.: Передовые методы сварки. - Иркутск, 1974, с.5-6.

2. Матханов В.Н., Нецветаев В.А., Ганно Н.А. Технологическая прочность низколегированных сталей при сварке в зимнее время. - Сб. докл. Всесоюзн. научно-технич. конф.: Работоспособность машин и конструкций в условиях низких температур. Хладостойкость материалов. Ч.2. - Иркутск, 1974, с.221-225.

3. Матханов В.Н., Нецветаев В.А. Пластинчатые трещины при сварке низколегированных сталей в зимних условиях. - В сб.: Передовые способы сварки и наплавки. - Иркутск, 1976, с.31-33.

4. Нецветаев В.А., Матханов В.Н. Исследование сопротивляемости сталей ЮГ2С1 и ЮХСНД образованию пластинчатых трещин при сварке в зимних условиях. - В сб.: Хладостойкость сварных

соединений.-Якутск, 1978, с.94-97.

5. Нецветаев В.А. Определение сопротивляемости сталей образованию пластинчатых трещин при сварке. - В сб.: Прогрессивная технология сварки и резки металлов.-Иркутск, 1979, с.148-153.

6. Нецветаев В.А., Макаров Э.Л. Пластинчатые трещины при сварке низколегированных сталей в условиях отрицательных температур. - В сб.: Прогрессивная технология сварки и резки металлов.-Иркутск, 1979, с.22-24.

7. Матханов В.Н., Ганно Н.А., Нецветаев В.А., Яковлев Е.Г. Пути повышения работоспособности сварных конструкций в условиях отрицательных температур.-Тез.докл. Всесоюз.конф., посвященной 50-летию подготовки инженеров-сварщиков. - Владивосток, 1980, с.17-18.

8. Ганно Н.А., Нецветаев В.А. Влияние подготовки электродов на работоспособность сварных соединений из низколегированных сталей. - В сб.: Повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами.-Иркутск, 1980, с. 169-174.

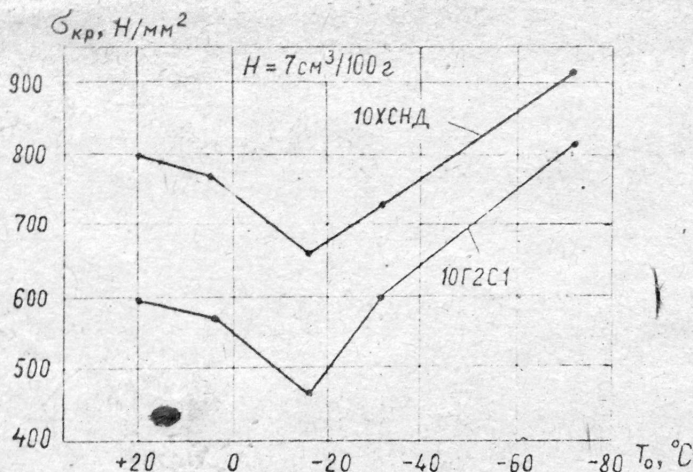


Рис. 1. Влияние отрицательной температуры среды на сопротивляемость низколегированных сталей холодным ламинарным трещинам при сварке.

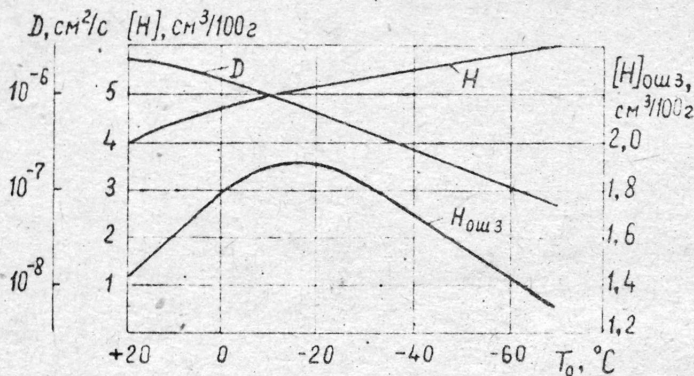


Рис. 2. Влияние отрицательной температуры среды на начальное содержание диффузионного водорода в шве H , его коэффициент диффузии D и содержание в околошовной зоне через 12 часов после сварки $H_{0шз}$.