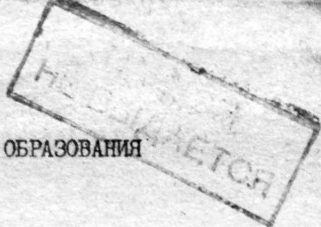


14376107

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

ГОНЧАРОВА Раиса Дмитриевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ
МНОГОСЛОЙНОЙ СВАРКИ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СРЕДНЕ-
ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН
В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: д.т.н., профессор МАКАРОВ Э.Л.

Официальные оппоненты: д.т.н., старший научный сотрудник
ЗУБЧЕНКО А.С.

к.т.н., доцент ХАКИМОВ А.Н.

Ведущее предприятие — НИИТ

Защита состоится " " _____ 1981 г. на заседании

специализированного Совета КО53.15.03 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, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах. _____
по указанному адресу.

С диссертацией можно озна

Автореферат разослан "

Ученый секретарь
специализированного Совета

д.т.н., доцент

Вз

М376104

Л - 86194 от 22.05.81 г. Ос

Типография М

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

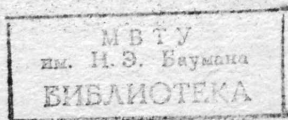
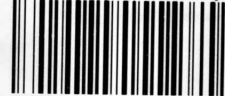
Актуальность проблемы. В настоящее время резко возрос объем применения высокопрочных среднелегированных сталей бейнитного и мартенситного классов. Расширение производства сварных изделий из высокопрочных сталей связано со значительными трудностями, возникающими при их сварке. Конструкционные среднелегированные стали склонны к образованию холодных трещин в сварных соединениях. Их возникновение связано с развитием ряда физических процессов, протекающих в металлах при сварке. При многослойной сварке кроме общеизвестных факторов, влияющих на образование холодных трещин, необходимо учитывать еще и изменение структуры околошовной зоны, вследствие многократности последующего нагрева. В результате этого в металле околошовной зоны могут развиваться такие явления, как старение, отпускная хрупкость, выделение карбидных или другого типа фаз на границах аустенитных зерен и другие. В настоящее время отсутствуют данные о влиянии каждого из этих явлений на сопротивляемость многослойных сварных соединений холодным трещинам.

Для разработки эффективных мер борьбы с холодными трещинами необходимо проведение исследования природы и условий их образования при многослойной сварке. Решение этой задачи должно расширить представления о структурообразовании в многослойных сварных соединениях среднелегированных сталей и, установив основные причины образования холодных трещин при многослойной сварке, дать возможность управлять этим процессом. Работа в этом направлении выполнялась по заданию промышленности.

Цель работы. Повышение стойкости многослойных сварных соединений из среднелегированных бейнитных сталей против образования холодных трещин путем регулирования теплового режима сварки.

Методы исследования. Оценка сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при многослойной сварке выполнялась с помощью усовершенствованной методики ЛТИЗ-6М, заключающейся в воспроизведении термомеханических циклов многослойной сварки на образцах ограниченных размеров, электролитическом насыщении их водородом и испытании на замедленное разрушение постоянной длительно действующей нагрузкой по схеме четырехточечного изгиба.

Измерение среднего содержания диффузионноподвижного водорода в образцах производилось вакуумным методом, разработанным в ЛПИ им. М.И.Калинина. Содержание полного и остаточного водорода



в образцах определялось методом вакуум-плавления в инертных газах на установке фирмы "Leco".

Для исследования структурного состояния металла околосварной зоны многослойного сварного соединения применялись металлографический, электронномикроскопический анализы. Для выявления характера изломов образцов и состояния их поверхности использовался фотомикроскопический метод исследования с помощью растрового электронного микроскопа.

Исследования химического состава приграничных зон действительных аустенитных зерен проведены на электронном сканирующем микроскопе с микроанализатором "Камебако".

Выбор оптимального теплового режима сварки, уменьшающего вероятность образования холодных трещин при многослойной сварке, выполнен расчетным путем с использованием ЭВМ ЕС-1020.

Научную новизну работы составляет установление причин повышенной склонности среднелегированных $Cr-Ni-Mo$ бейнитных сталей образованию холодных трещин при многослойной сварке, заключающихся в охрупчивании ОШЗ в результате неоднократного последующего нагрева в процессе сварки в районе температур 400–500°C. Показано, что охрупчивание проявляется только в крупнозернистом металле ОШЗ уже при кратковременном пребывании в области температур 400–500°C в течение нескольких минут и при условии насыщения водородом выше некоторого критического содержания и может быть объяснено явлением сегрегации фосфора на границы зерен, ослабляющих их сцепление.

Практическая ценность. На основе проведенных исследований разработана оперативная количественная методика дифференциальной оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при многослойной сварке, позволяющая снизить продолжительность, металлоемкость и трудоемкость исследований по свариваемости новых марок сталей. Особенностью рекомендуемой методики является имитация на образцах малого размера термомеханического цикла многослойной сварки, электролитическое их насыщение водородом до заданной концентрации и испытание на замедленное разрушение по схеме чистого изгиба.

Составлен алгоритм и разработана программа, позволяющая рассчитывать оптимальную температуру предварительного и сопутствующего подогрева, повышающего сопротивляемость сталей образованию холодных трещин за счет уменьшения длительности пребывания металла околосварной зоны в районе температур 300–500°C или увеличения макси-

мальной температуры последнего высокотемпературного цикла до температур высокого отпуска или частичной перекристаллизации.

Результаты работы внедрены в 1979–1980 гг. в судостроительной промышленности с годовым экономическим эффектом 20 тыс. рублей и могут быть рекомендованы для использования на предприятиях тяжелого, энергетического, химического, транспортного машиностроения.

Апробация. Результаты проведенных исследований докладывались на VI научно-технической конференции в г. Калуге (1980 г.), на научно-техническом семинаре "Пути повышения качества, долговечности и надежности сварных и паяных изделий" МЦНТИ им. Дзержинского Ф.Э. (1980 г.), У Всесоюзной научно-технической конференции "Теплофизика технологических процессов" в г. Волгограде (1980 г.), а также на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1980 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и приложений. Выполнена на 169 машинописных листах, содержит 54 рисунка, 8 таблиц, 121 наименование используемых литературных источников и двух приложений.

Глава I. Содержит анализ причин, вызывающих образование холодных трещин в сварных соединениях среднелегированных сталей при многослойной сварке. Рассмотрены факторы, обуславливающие образование холодных трещин: структурное состояние металла сварного соединения, характеризующее наличием составляющих мартенситного и бейнитного типов; содержание и распределение водорода в шве и околошовной зоне непосредственно после сварки; уровень растягивающих сварочных напряжений первого рода.

Образование холодных трещин в сварных соединениях связано, в первую очередь, с определенными изменениями структуры металла в результате сварки по сравнению со структурой металла в состоянии поставки. При многослойной сварке структурный фактор существенно усложняется, так как изменение структуры происходит не только от теплового воздействия при наложении первого слоя, но и в результате неоднократного нагрева до различных температур при укладке остальных слоев. Причем, в зависимости от количества слоев, это воздействие может быть неоднократным и весьма длительным. Анализ термических циклов при различных технологических вариантах многослойной сварки показывает, что металл подвергается относительно длительному последующему нагреву при температурах 100–500°C. В результате этого в околошовной зоне возможно развитие таких процессов, как деформационное и динамическое старение, отпускная хрупкость и другие.

Склонность металла сварного соединения к образованию холодных трещин зависит также и от содержания в нем водорода. Повышение содержания водорода в сварном соединении приводит, как правило, к увеличению склонности к образованию трещин. Влияние водорода на возникновение и развитие трещин весьма различно. При образовании в сварном соединении мартенситной структуры влияние водорода на склонность к трещинам незначительно, при образовании смешанной перлитно-мартенситной, бейнитно-мартенситной и бейнитной структуры водород заметно снижает сопротивляемость стали трещинам.

Третье условие образования холодных трещин включает в себя сварочные напряжения I-го рода и структурные напряжения II-го рода. Межкристаллическое разрушение инициируется напряжениями II-го рода, пики концентраций которых особенно характерны для такого нестабильного материала, как околошовная зона или шов после сварки. Величина напряжений II рода зависит от развития фазовых и структурных превращений и уровня напряжений I рода. Для многослойных соединений также характерен непрерывный процесс деформирования при сварке как результат локальной деформации при действии неоднократных тепловых импульсов, так и вследствие общего перераспределения деформаций и напряжений в сварном соединении.

По характеру зависимости разрушающих напряжений от времени до разрушения холодные трещины являются одним из случаев замедленного разрушения стали. Это показано в исследованиях К.Коттрелла, Н.Н.Прохорова, Э.Л.Макарова, А.М.Макары, М.Х.Шоршорова и др. исследователей.

В настоящее время имеется относительно небольшое количество проб, позволяющих оценить склонность многослойных сварных соединений к образованию холодных трещин при сварке. При использовании технологических сварочных проб весьма затруднительно дать дифференциальную оценку каждого фактора, ответственного за образование трещин, а именно: состава стали, изменения структуры при многослойной сварке, наличия водорода. Существующие методы предусматривают моделирование в образцах сварочных термического и термомеханического циклов и испытание на замедленное разрушение применительно к однослойной сварке.

На основании проведенного анализа литературных данных основные задачи работы можно сформулировать следующим образом:

I. Разработка методики испытания металлов с воспроизведением термомеханического цикла многопроходной сварки и водородного насыщения для дифференциальной оценки влияния металлургических и

технологических факторов, обуславливающих образование холодных трещин в многослойных сварных соединениях.

2. Изучение физических процессов, обуславливающих повышенную склонность к образованию холодных трещин, в околосварной зоне многослойных соединений.

3. Разработка рекомендаций по выбору температуры предварительного и сопутствующего подогрева при многослойной сварке среднелегированных бейнитных сталей типа 12Х2Н3МД, обеспечивающей максимальную стойкость сварных соединений против образования холодных трещин.

Глава 2. Посвящена исследованию многократного нагрева околосварной зоны среднелегированных сталей в процессе многослойной сварки на ее сопротивляемость образованию холодных трещин. Разработана количественная дифференциальная методика оценки влияния термического и термодформационного цикла многослойной сварки на склонность околосварной зоны к замедленному разрушению. Методика воспроизводит тепловые и деформационные условия на образцах ограниченных размеров из основного металла применительно к многослойной сварке и вместе с электролитическим их наводороживанием при испытании постоянной нагрузкой дает возможность получения замедленного межкристаллического разрушения, характерного для холодных трещин. Имитация термического цикла сварки осуществляется путем нагрева образца размером 1,5х10х100 мм проходящим электрическим током. Последующий нагрев образца производится либо также проходящим электрическим током, либо специальной печью, установленной в узле нагрева и нагружения установки ЛТПЗ-6М (рис.1). После обработки образцов имитированным термодформационным циклом сварки они наводороживаются в электролитической ячейке установки до определенной концентрации диффузионного водорода, затем на них наносится концентратор в виде надреза шириной 0,4 мм и глубиной 2,5 мм и образцы испытываются на замедленное разрушение по схеме чистого изгиба путем нагружения постоянным усилием. За количественный показатель сопротивляемости стали замедленному разрушению принимается минимальное среднее растягивающее напряжение от изгиба, вызывающее растяжение образца или образование в нем трещины по истечении 20...24 часов.

Было исследовано несколько схем моделирования условий одно- и многослойной сварки (рис.2) и в качестве основных были выбраны схемы "б", "д" и "е".

Исследовался широкий диапазон температур и времени последующего нагрева образцов, обработанных имитированным термическим цик-

лом однослойной сварки с $T_{max} = 1370^{\circ}\text{C}$ (схема "д"). Испытанию подвергались среднелегированные бейнитные стали типа 12Х2Н3МДА, 12ХН4МДА, стали мартенситного класса типа 40ХН2МА и стали перлитного класса типа 15Х2МФА. Сопротивляемость сталей типа 12Х2Н3МДА замедленному разрушению после имитации высокотемпературного сварочного термического цикла снижается в результате последующего нагрева до температур $300-500^{\circ}\text{C}$ в течение 1 и более минут. При этом минимальная сопротивляемость соответствует нагреву до температур $400-500^{\circ}\text{C}$ в течение 10 и более минут и может составлять 50% от сопротивляемости замедленному разрушению образцов после однократного воздействия высокотемпературного сварочного цикла. Установлено, что охрупчивание после последующего нагрева проявляется только для металла, находящегося в структурном состоянии околослойной зоны (после воздействия высокотемпературного цикла с $T_{max} > 900^{\circ}\text{C}$) и насыщении его водородом выше некоторого критического содержания его в металле 0,13. Последующий нагрев под нагрузкой дает дополнительное снижение сопротивляемости замедленному разрушению на 15-20% по сравнению с нагревом без нагружения (рис.3).

Среднелегированные стали перлитного класса типа 15Х2МФА и стали мартенситного класса типа 40ХН2МА не склонны к существенному снижению сопротивляемости замедленному разрушению после последующего нагрева при указанных выше температурах.

Показано, что склонность среднелегированных бейнитных сталей к замедленному разрушению при многослойной сварке зависит от ряда причин. К основным факторам можно отнести: длительность пребывания металла околослойной зоны в районе "опасных" температур и насыщение его диффузионным водородом. Установлено, что даже короткое время пребывания металла 0,13 при температуре 400°C вызывает его охрупчивание. Для сталей типа 12Х2Н3МДА критическое время пребывания металла околослойной зоны ($\Delta t_{крит}$), вызывающее снижение показателя сопротивляемости σ_{pmin} по сравнению с σ_{pmin} однослойной сварки на 25-30%, составляет 3 минуты. Критическое количество водорода, вызывающее замедленное разрушение околослойной зоны после последующего нагрева равно $0,4-0,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

С целью исследования влияния теплового режима многослойной сварки на склонность металла околослойной зоны к замедленному разрушению был рассмотрен ряд различных вариантов. Установлено, что изменение скорости охлаждения околослойной зоны в процессе действия первого высокотемпературного цикла изменяет абсолютное значение σ_{pmin} стали типа 12ХН4МДА после последующего нагрева в

той же степени, что и при изменении скорости охлаждения применительно к однослойной сварке. Относительное же снижение показателя сопротивляемости замедленному разрушению в рассмотренных случаях остается неизменным.

В околослойной зоне каждого слоя многослойного сварного соединения имеется ряд точек с различной тепловой обстановкой. Получены данные, позволяющие определить наиболее опасные участки околослойной зоны с точки зрения образования холодных трещин.

Свойства металла околослойной зоны в значительной степени зависят от времени и условий вылеживания его после сварки, то есть от так называемого "отдыха". С целью определения влияния "отдыха" на стабилизацию структуры околослойной зоны многослойного сварного соединения были проведены исследования на образцах, обработанных имитированным термическим циклом многослойной сварки. На склонность к замедленному разрушению испытывались образцы после вылеживания при комнатной температуре в течение 4-х месяцев. Установлено, что влияние "отдыха" при комнатной температуре на показатель сопротивляемости замедленному разрушению не проявляется. Никаких изменений в структуре металла ОШЗ, приводящих к повышению прочности металла в связи с его вылеживанием, не происходит. В то время как применительно к однослойной сварке "отдых" металла ОШЗ при тех же условиях вылеживания и испытаний приводит к повышению *бpm* примерно на 30%.

Глава 3. Посвящена исследованию причин повышенной склонности к образованию холодных трещин в околослойной зоне среднелегированных сталей при многослойной сварке.

Металлографические исследования шлифов, вырезанных из образцов стали типа 12Х2Н3МДА, обработанных имитированным термическим циклом одно- и многослойной сварки, позволили установить, что значительных изменений в структуре околослойной зоны, способствующих развитию хрупкости, не наблюдается. В структуре образцов после последующего нагрева до 400°C отмечены некоторые признаки отпуска, что подтверждается замерами микротвердости и макротвердости. Образцы, прошедшие обработку термическим циклом однослойной сварки имеют *HV* 350, образцы после последующего нагрева — *HV* 300.

При травлении образцов реактивом на основе пикриновой кислоты установлена повышенная травимость границ действительных аустенитных зерен в металле околослойной зоны образцов после последующего нагрева. Металлографические исследования шлифов, вырезанных из образцов, обработанных имитированным термическим циклом много-

слоистой сварки и испытанных на замедленное разрушение позволило установить, что трещины инициируются и распространяются в основном по границам действительных аустенитных зерен. Таким образом, склонность к их образованию, наряду с другими факторами, зависит от состояния и свойств границ аустенитных зерен, сформировавшихся в процессе термического воздействия сварки на металл околосварочной зоны.

Повышенная травимость границ действительных аустенитных зерен связана, в первую очередь, с изменением химического состава приграничных зон. Существуют предположения, что сегрегации примесей и легирующих элементов по границам зерен, по-видимому, уменьшают сцепление между ними. Примеси и легирующие элементы на границах зерен также могут снижать работу образования единицы поверхности возникающей зародышевой субмикротрещины ($\lambda_n - 0,5 \lambda_r$) за счет снижения поверхностной энергии (λ_n) и избыточной энергии межзеренных границ (λ_r).

Для объяснения причин снижения сопротивляемости образованию холодных трещин при многослойной сварке были проведены тонкие исследования структуры металла околосварочной зоны, фактографические исследования изломов, исследование химического состава приграничных зон действительных аустенитных зерен.

Электронномикроскопические исследования угольных реплик позволили установить, что выдержка образцов, прошедших обработку имитированным термическим циклом однослойной сварки, при 400°C приводит к частичному распаду бейнитной составляющей стали типа 12Х2Н3МД. Иголообразность продуктов бейнитного превращения после последующего нагрева теряется и структура становится менее однородной. Наблюдается некоторое увеличение количества и частичная коагуляция карбидных выделений при многослойной сварке по сравнению с однослойной сваркой. Исследования тонких фольг показали, что в структурах образцов стали типа 12Х2Н3МД кроме бейнита содержится пластинчатый мартенсит и небольшое количество остаточного аустенита.

Таким образом и электронномикроскопические исследования показали, что изменения структуры после последующего нагрева по своему характеру, видимо, не могут привести к снижению сопротивляемости замедленному разрушению.

При анализе изломов образцов, обработанных имитированным термическим циклом одно- и многослойной сварки и испытанных на замедленное разрушение, установлены две зоны: зона, соответствующая по-

степенному образованию очага разрушения и его развития (хрупкая составляющая излома) и зона так называемого "мгновенного" долома (вязкая составляющая излома). Определено процентное соотношение площадей хрупкого и вязкого участков излома на образцах. В образцах применительно к однослойной сварке доля хрупкого излома составляет примерно 30%, вязкого примерно 70%, а в образцах после последующего нагрева примерно 75% и 25% соответственно. Излом образцов, обработанных термическим циклом применительно к многослойной сварке, носит более хрупкий характер, чем у образцов, которые подвергались воздействию термическим циклом однослойной сварки.

Усиление травимости границ зерен в растворах пикриновой кислоты в образцах после последующего нагрева можно объяснить изменением содержания фосфора и его аналогов — сурьмы, мышьяка в приграничных зонах. Повышение их концентрации усиливает травимость, а снижение до среднего уровня ослабляет ее.

Исследования распределения химических элементов в приграничных зонах действительных аустенитных зерен показали, что изменений в содержании углерода и серы в образцах после последующего нагрева по сравнению с образцами без него не наблюдается. В распределении же фосфора наблюдается отчетливое различие. В образцах, подвергнутых последующему нагреву при 400°C установлена в приграничной зоне несколько большая неоднородность его распределения и более высокий средний уровень содержания фосфора, чем в приграничной зоне образцов, обработанных термическим циклом однослойной сварки.

Подтверждение обогащения приграничной зоны аустенитных зерен в результате последующего нагрева фосфором было получено и при определении химического состава этих зон непосредственно на изломе образца. Наличие границ с сегрегацией на них фосфора было установлено в образцах после последующего нагрева и химическим путем с помощью специального реактива, выявляющего сегрегации фосфора и наличие карбидов.

Результаты проведенных исследований позволили установить аналогию охрупчивания металла ОШЗ после последующего нагрева до температур $300-500^{\circ}\text{C}$ с обратимой отпускной хрупкостью. Физическая природа этого явления окончательно до сих пор не выяснена.

Глава 4. Содержит расчет теплового режима многослойной сварки и его влияние на структуру околосшовной зоны. Основной целью данной задачи является расчет термических циклов заданной точки

околошовной зоны в многослойном сварном соединении и выбор оптимальных параметров режима сварки и температуры подогрева, не вызывающих критических изменений технологической прочности металла околошовной зоны.

В качестве расчетной схемы нагрева выбрана схема плоского слоя. Для решения поставленной задачи распространения тепла применен аналитический метод расчета – метод источников. Для описания процесса распространения тепла при многослойной сварке толстых листов выбран непрерывно действующий перемещающийся точечный источник тепла постоянной мощности. Граничные поверхности тела приняты адиабатическими, поэтому при расчете температуры точки околошовной зоны кроме тепла действующего источника учитываются его отражения от нижней и верхней поверхностей листа.

Для того, чтобы тепловой поток от принятого источника тепла в расчетной схеме соответствовал действительному тепловому потоку при укладке различных слоев многослойного шва, в расчетную формулу введен поправочный коэффициент A приведения погонной энергии, учитывающий разделку кромок, толщину пластины и расстояние слоя от поверхности пластины:

$$A = -0,4|\delta/2 - Z_{qi}| + 2,4 \quad (1)$$

где δ – толщина пластины;

Z_{qi} – координата источника тепла.

Таким образом:

$$T(\alpha) = A \frac{q}{4\pi\lambda R_i} \exp\left[\left(-\frac{V_s\delta}{2\alpha}\right)(R_i + V_s\delta \cdot t)\right] \quad (2)$$

где A – поправочный коэффициент приведения погонной энергии;

$q = \eta \cdot U_s \cdot I_s$ – мощность источника;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности;

R_i – расстояние от источника до точки в подвижной системе координат;

V_s – скорость сварки;

t – текущее значение времени.

Теплофизические свойства тела, характеризующие коэффициентами теплопроводности λ , объемной теплоемкости $c\gamma$ и коэффициентом температуропроводности α , приняты постоянными во всем теле за все время процесса и не зависящими от температуры.

Для решения поставленной тепловой задачи был составлен алгоритм и разработана программа (рис.4). Решение ее осуществлялось на машине ЕС-1020. Составленная программа позволяет выбрать оптимальную температуру предварительного и сопутствующего подогрева, обеспечивающего время пребывания металла околошовной зоны в районе "опасных" температур меньше критического. Программа применима для расчетов температуры подогрева при ручной дуговой сварке, автоматической сварке под флюсом и сварке в среде защитных газов.

В качестве примера приведен расчет оптимальной температуры подогрева при ручной дуговой сварке стали типа 12Х2Н3МДА толщиной 40 мм с X-образной разделкой кромок. В данном конкретном примере оптимальная температура подогрева, не приводящая к повышению склонности стали к образованию холодных трещин, равна 112°C. Температура подогрева, установленная экспериментальным путем и применяемая при производстве изделий из стали типа 12Х2Н3МДА составляет 120°C.

Данный расчет температуры подогрева учитывает только "тепловое" охрупчивание металла. При учете влияния подогрева на десорбцию водорода из сварного соединения возможна ее некоторая корректировка в сторону повышения в пределах увеличения сопротивляемости сварных соединений холодным трещинам за счет снижения концентрации водорода.

Разработанный алгоритм и программа для расчета оптимальной температуры подогрева могут быть использованы при разработке новой технологии сварки при изменении марки сталей, конструкции узлов, способа и режимов сварки.

Глава 5. Даны технологические рекомендации, повышающие сопротивляемость среднелегированных $C_{2-Ni-Mo}$ бейнитных сталей образованию холодных трещин при многослойной сварке.

Показано, что обоснованный выбор температуры подогрева при многослойной сварке соединений из среднелегированных сталей является одним из способов обеспечения стойкости сварных соединений против образования холодных трещин.

В качестве другого метода, повышающего сопротивляемость образованию холодных трещин в околошовной зоне при многослойной сварке, можно рекомендовать термообработку сварных соединений сразу же после окончания сварки, заключающуюся в кратковременном нагреве до температур выше 600°C. Подобный эффект может быть получен при рациональном выборе термического цикла многослойной сварки при котором максимальная температура последнего высокотемператур-

ного цикла лежит в области температур высокого отпуска или частичной перекристаллизации, за счет чего снижается эффект закалки от действия первого высокотемпературного цикла, а, следовательно, и эффект охрупчивания в области температур 500–300°C при завершении охлаждения. Нагрев до температур 600–650°C, то есть высокий отпуск, помимо благоприятного воздействия на структуру снимает практически остаточные сварочные напряжения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика дифференциальной количественной оценки сопротивляемости среднелегированных конструкционных сталей замедленному разрушению в условиях имитированного сварочного термодеформационного цикла многослойной сварки и различного насыщения водородом. Она позволяет в сравнительно короткий период времени получить сведения о склонности сталей к образованию холодных трещин при относительно малой трудоемкости исследований и металлоемкости образцов.

2. Установлено, что сопротивляемость замедленному разрушению $Cr-Ni-Mo$ бейнитных сталей, претерпевших высокотемпературный термический цикл и последующий нагрев в области температур 300–500°C снижается по сравнению со случаем однократного воздействия термического цикла примерно на 50%. Последующий нагрев под нагрузкой до $\sigma = 300-450$ МПа дает дополнительное снижение сопротивляемости замедленному разрушению на 15–20%. Показано, что охрупчивание проявляется только в крупнозернистом металле околошовной зоны, претерпевшей сварочный нагрев выше температуры 1200°C и обязательном насыщении водородом выше определенной критической концентрации.

Стали перлитного и мартенситного классов к существенному снижению сопротивляемости замедленному разрушению после последующего нагрева не склонны.

3. Определены критические значения основных факторов, совместно обуславливающих замедленное разрушение околошовной зоны применительно к многослойной сварке. Для стали типа 12Х2Н3МЦА критическое содержание диффузионного водорода, вызывающего замедленное разрушение составляет 0,4–0,5 см³/100 г. Критическое время пребывания в районе "опасных" температур 300–500°C, вызывающее снижение сопротивляемости замедленному разрушению на 25–30% составляет 3 и более минут.

4. Выдвинуто предположение о наиболее вероятных причинах про-

вышенной склонности среднелегированных $Cr-Ni-Mo$ сталей бейнитного класса замедленному разрушению при многослойной сварке, вызывающие охрупчивание околосварной зоны в результате неоднократного последующего нагрева в процессе сварки до температур $500-300^{\circ}\text{C}$. Эти причины заключаются в сегрегации фосфора на границы аустенитных зерен, которая может приводить к снижению прочности сцепления по границам.

5. Составлен алгоритм и разработана программа для расчета оптимальной температуры предварительного и сопутствующего подогрева, обеспечивающего длительность пребывания металла околосварной зоны в районе "опасных" температур $500-300^{\circ}\text{C}$ меньше экспериментально установленного критического времени или повышение максимальной температуры последнего высокотемпературного цикла в область температур $600-1000^{\circ}\text{C}$.

6. Даны технологические рекомендации по повышению стойкости сварных многослойных соединений сталей типа 12Х2Н3МД против образования холодных трещин, заключающиеся в научно-обоснованном выборе температуры предварительного и сопутствующего подогрева, а также кратковременного нагрева сварного соединения сразу после сварки до температур $600-650^{\circ}\text{C}$.

7. Результаты работы внедрены в судостроительной промышленности в 1980 году с годовым экономическим эффектом 20 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Макаров Э.Л., Гончарова Р.Д. Исследование склонности околосварной зоны среднелегированных сталей при многослойной сварке к образованию холодных трещин. В сб. Пути повышения качества долговечности и надежности сварных и паяных изделий. МДНТИ им. Дзержинского, 1980, с.9-12.
2. Гончарова Р.Д., Макаров Э.Л. Исследование причин образования холодных трещин в околосварной зоне среднелегированных сталей при многослойной сварке. В сб. тезисов 6-й научно-технической конференции НТО Машпром, Калуга, 1980, с.III-III.
3. Макаров Э.Л., Гончарова Р.Д. Расчет термических циклов многослойной сварки и их влияние на склонность ОШЗ среднелегированных сталей замедленному разрушению. В сб. тезисов У-й Всесоюзной научно-технической конференции "Теплофизика технологических процессов". Волгоград, 1980, с.129.

СХЕМА УСТАНОВКИ ЛТПЗ-6М

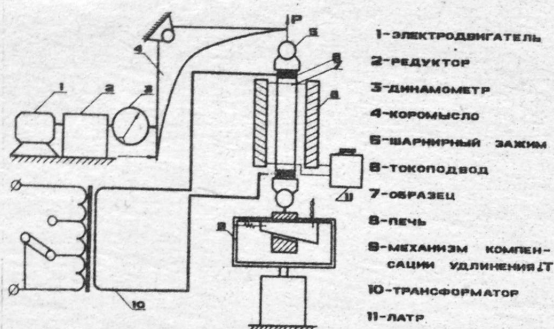
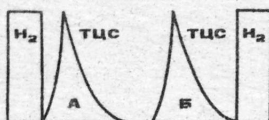
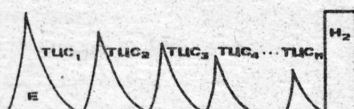


Рис. 1. Схема установки ЛТПЗ-6М.

ОДНОСЛОЙНАЯ СВАРКА



МНОГОСЛОЙНАЯ СВАРКА



ПН-ПОСЛЕДУЮЩИЙ НАГРЕВ
ТЦС-ТЕРМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ СВАРКИ
H₂-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ НАСЫЩЕНИЕ ВОДОРОДОМ

Рис. 2. Моделирование условий одно- и многослойной сварки.

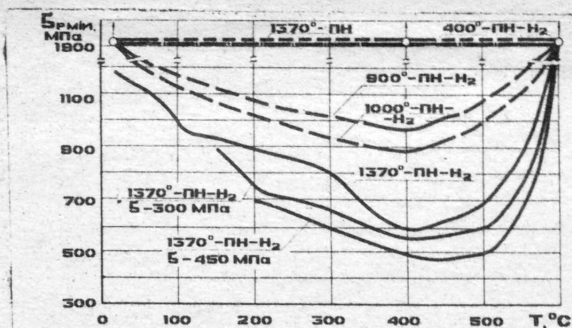


Рис. 3. Зависимость показателя сопротивляемости замедленному разрушению (σ_{min}) образцов стали типа 12Х2Н3МД, обработанных термическим циклом сварки с различной T_{max} , от температуры последующего нагрева (T). ($T_{max} = 1370^{\circ} \dots 400^{\circ}$; количество диффузионного водорода равно $1,7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$).

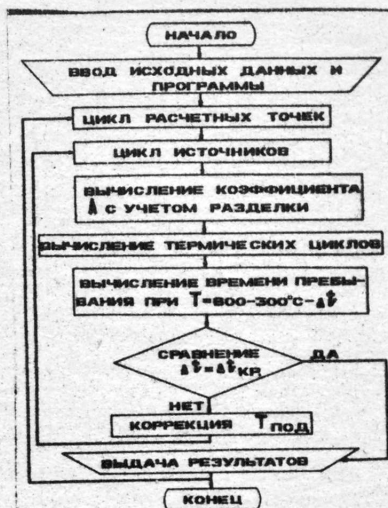


Рис. 4. Блок-схема программы.