

МЗ61634

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

ДРИЖОВ Виктор Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ
ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВТОРНОМ НАГРЕВЕ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Тру-
дового Красного Знамени высшем техническом училище имени
Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ПРОХОРОВ Н.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ОВЧИННИКОВ А.Г.
кандидат технических наук
СИМОНИК А.Г.

Ведущее предприятие - ЦНИИТМАШ

Защита диссертации состоится " " _____ 1980 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по техно-
логии и машинам сварочного производства Московского ордена
Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего техниче-
ского училища имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005,
2-я Бауманская, 5.

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

_____ читаться в библиотеке МВТУ имени

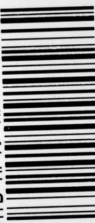
_____ 1980 г.

В.М.Ямпольский
В.М.ЯМПОЛЬСКИЙ

Объем I п.л.
Тир. 105

М 361634

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1361634

Дризов В.С. Исследование ра

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблема повышения качества и надежности сварных соединений из низколегированных теплоустойчивых сталей, жаропрочных аустенитных сталей и никелевых сплавов неразрывно связана с проблемой борьбы с разрушением этих сталей и сплавов при повторном нагреве.

Из теплоустойчивых, жаропрочных сталей и никелевых сплавов изготавливаются ответственные сварные конструкции во многих отраслях народного хозяйства (теплоэнергетики, химического машиностроения, авиационной промышленности и др.). К качеству этих конструкций предъявляются особые требования, так как выход из строя какого-либо агрегата приводит к значительным материальным убыткам (например, простой блока электростанции в 500 Мвт одни сутки наносит ущерб, по данным ЦКТИ, порядка 23 тыс. рублей).

Проблема разрушения при повторном нагреве (РПН) существенно тормозит внедрение в отечественное производство сталей с повышенными эксплуатационными характеристиками. При разработке новых сталей, предназначенных для работы при повышенных температурах, исследователи столкнулись с противоречием: чем выше эксплуатационные свойства стали, а повышение этих свойств достигается путем введения в состав стали энергичных карбидообразующих элементов, тем выше склонность этих сталей к РПН.

Изучение условий образования РПН в сварных соединениях позволяет, во-первых, разработать стали с пониженной склонностью к этому виду разрушения. И, во-вторых, предусмотреть в технологии изготовления сварной конструкции мероприятия, способствующие повышению сопротивляемости материала РПН. Работа в этом направлении выполнялась по заданию промышленности.

Цель работы. Целью настоящей работы явилось повышение сопротивляемости разрушению при повторном нагреве сварных конструкций из теплоустойчивых сталей путем исследования условий образования дефектов данного вида и разработка методики сравнительной количественной оценки склонности материала к разрушению в этих условиях.

Методы исследования. Решение поставленной задачи осуществлялось путем экспериментального анализа эффективности методов испытания, основанных на применении различных режимов термомеханического воздействия в процессе повторного нагрева. В результате проведенных исследований выбран наиболее эффективный метод, заключающийся в испытании специального малогабаритного сварного образца с искусственно регулируемым термическим циклом сварки в

режиме релаксации приложенных внешних напряжений при повторном нагреве.

При выборе размеров образца проведен расчетный анализ влияния его жесткости на термомеханический цикл в околошовной зоне теплоустойчивых сталей. Исследование проведено численным методом на ЭВМ с использованием дилатометрических и релаксометрических данных, полученных экспериментальным путем.

Исследования дилатации теплоустойчивых сталей в условиях сварки проведены на быстродействующем дилатометре, конструкции ЛТП МВТУ им. Баумана.

Исследования сопротивления теплоустойчивых сталей деформированию в неравновесных условиях сварки проведены на релаксметре, конструкции ЛТП МВТУ им. Баумана.

Для исследования структурного состояния металла сварных соединений применялся металлографический анализ.

Анализ перераспределения водорода в процессе сварки у дислокаций выполнен расчетным методом с использованием ЭВМ.

Научная новизна. а) На основе анализа термдеформационных циклов в различных зонах сварных соединений из теплоустойчивых сталей типа 15Х2НМФА установлено, что растягивающие остаточные продольные напряжения, влияющие на РПН, возникают в металле околошовной зоны при отношении ширины к толщине пластины в условиях однопроходной сварки ($\frac{b}{\delta} = 6600 \text{ кал/см}^2$) равном 30. На этой основе показана необходимость применения при исследовании сопротивляемости сталей РПН технологических проб больших габаритов, что увеличивает металлоемкость проводимых испытаний. Уменьшение металлоемкости образцов в данной работе достигнуто за счет приложения внешних сил.

б) В результате проведенных исследований установлено отрицательное влияние на сопротивляемость РПН повышенного содержания водорода в металле шва.

Расчетный анализ перераспределения водорода у дислокаций в процессе сварки и при повторном нагреве показал, что часть адсорбированного на дислокациях водорода при нагреве до субкритических температур остается на дислокациях. При развитии локальной пластической деформации у границ зерен водород может транспортироваться дислокациями в приграничные области, понижая сопротивляемость металла межзеренному разрушению.

в) Установлено, что участки ОШЗ, нагреваемые при сварке до различных максимальных температур, имеют различную релаксацион-

ную стойкость. Усиленная релаксация внутренних растягивающих напряжений в волокнах, нагреваемых в процессе сварки до $T=1200-800^{\circ}\text{C}$, способствует подгрузке металла у линии сплавления и, как следствие, увеличению возможности образования РПН у зоны сплавления.

Практическая ценность. На основе проведенных исследований рекомендована методика испытания сварных соединений на прочность при повторном печном нагреве, производимом с целью устранения остаточных напряжений. Особенностью рекомендуемой методики является применение малотабаритного сварного образца, в котором необходимая высокая скорость охлаждения при сварке обеспечивается искусственным охлаждением околошовной зоны, а необходимые разрушающие напряжения обеспечиваются приложением внешних сил в режиме релаксации напряжений.

За показатель сопротивляемости материала РПН рекомендовано принимать критическое значение начальных напряжений, при котором в сварном образце начинают возникать трещины.

На основе исследования влияния технологических факторов на РПН разработаны мероприятия, позволяющие повысить сопротивляемость сварных соединений образованию РПН (применение предварительного подогрева перед сваркой; выбор основного и присадочного материала, обеспечивающего наименьшую склонность к РПН; применение технологических операций, позволяющих уменьшить количество водорода, попадающего при сварке в металл; назначение температуры повторного нагрева за пределами температурной области образования РПН). Полученные результаты использованы на предприятии судостроительной промышленности при изготовлении конструкций из теплоустойчивых сталей.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на научно-технической конференции "Сварка жаропрочных материалов" (Омск, 1978 г.), на научном семинаре кафедры АМ-7 МВТУ, на совещании специалистов стран СЭВ по теме XIX "Рационализация и повышение уровня исследования свариваемости", (Братислава, ЧССР, 1979 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов по работе. Выполнена на 218 машинописных листах, содержит 93 рисунка и 123 наименования используемых источников.

Глава I. Содержит обзор по трем основным аспектам: разрушение сварных соединений при повторном нагреве; методы исследования склонности материала к разрушению при повторном нагреве;

анализ результатов исследования РПН, полученных с помощью различных методов испытания.

Впервые проблема разрушения сварных соединений при повторном нагреве привлекла к себе внимание в начале 60 годов. Трещины возникали в сварных узлах в процессе повторного термического воздействия (послесварочной термической обработки, заварки дефектов сварки, наложения плакирующего слоя, нагрева для цинкования и др.).

К настоящему времени разрушения сварных соединений при повторном нагреве можно разделить на три основных вида: разрушения, возникающие в низкотемпературной области ($T=200-300^{\circ}\text{C}$); разрушения, возникающие в температурной области послесварочной термической обработки ($T=500-600^{\circ}\text{C}$); образование трещин под плакирующей наплавкой.

Проведенные исследования условий образования и характера разрушения при повторном нагреве сварных конструкций на практике позволили выделить основные признаки данного вида разрушения.

- Трещины при повторном нагреве возникают так в металле ОШЗ, так и в металле шва. Разрушение в ОШЗ встречается обычно чаще, чем в металле шва. Этот факт объясняется тем, что при сварке применяют, как правило, присадочный материал, менее склонный к РПН, чем основной.

- Трещины зарождаются преимущественно у концентраторов. Их часто обнаруживают у корня шва с неполным проплавлением, у шлаковых включений, у подрезов и небольших трещин.

- Трещины, возникающие при повторном нагреве, располагаются строго по границам первичных аустенитных зерен.

Анализ методов исследования склонности материала к РПН показывает, что при исследовании образования РПН с помощью различных методов используются три режима термомеханического воздействия на металл в процессе повторного нагрева.

1. Испытание в режиме постоянно действующих напряжений. Методика Дидук Т.А., Земзина В.Н.; методика Гранжона Х.; *"Constant Load Rupture"* и др.

2. Испытание в режиме постоянной скорости деформирования. Методики ЦКТИ (Земзин В.Н., Шрон Р.З.), МВТУ (Прохоров Н.Н., Бардокин Е.В.), ЦНИИТМАШ (Зубченко А.С., Федоров А.В.), Винкера и др.

3. Испытание в режиме релаксации действующих напряжений. Исследования с помощью жестких технологических проб; методика Ардентова В.В., Ананьева М.А., Баландина Ю.Ф., Ивановой Т.И.;

методика Murzey ; методики фирмы "Nippon Steel" и др.

Оценка склонности стали к РПН производится как с использованием образцов, подвергнутых имитированному воздействию термического цикла сварки, так и сварных образцов.

Необратимые процессы, развивающиеся во время сварки и при повторном нагреве, формируют условия прочности сварного соединения при повторном термическом воздействии. Термодеформационное воздействие цикла сварки на металл проявляется, с одной стороны, в изменении свойств отдельных зон сварного соединения и, с другой стороны, в изменении напряженно-деформированного состояния. Существенное влияние, как показывает опыт исследования условий разрушения сварных соединений при повторном нагреве, на сопротивляемость материала РПН оказывает пластичность, прочность зон разрушения и релаксационная стойкость основного металла. Пластичность отдельных зон сварного соединения зависит от максимальной температуры нагрева в процессе сварки. Минимальной пластичностью обладают участки непосредственно прилегающие к линии сплавления. Величина пластичности в этой зоне в большинстве случаев и определяет склонность к РПН (если она ниже $\delta = 10\%$, то сварное соединение склонно к РПН). Однако следует отметить, что при определенных условиях определяющее значение имеют свойства зоны разупрочнения. Изменение пластичности происходит не только в процессе сварки, но и при повторном нагреве, главным образом за счет дисперсионного упрочнения.

Энергетическим источником разрушения сварных соединений при повторном нагреве являются остаточные сварочные напряжения, релаксация которых сложным образом зависит от многих факторов. Изменение релаксационных свойств отдельных участков сварного соединения как в процессе сварки, так и при повторном нагреве приводит к перераспределению упругой энергии в ОШЗ, определяющему формирование очага разрушения. В этом плане исследование склонности сварного соединения к РПН целесообразно проводить с учетом взаимодействия всех участков сварного соединения. Ниже описано решение следующих задач.

1. Расчетное исследование термодеформационного цикла при сварке сварных соединений из теплоустойчивых сталей.
2. Разработка методики, позволяющей изменять термический цикл при сварке в малогабаритных сварных образцах.
3. Разработка, на основе испытания малогабаритных сварных

образцов в различных режимах термомеханического воздействия в процессе повторного нагрева, методики испытания склонности теплоустойчивых сталей к разрушению при повторном нагреве.

4. Исследование условий сварки и режимов повторного нагрева на сопротивляемость теплоустойчивых сталей РПН.

Глава II. Посвящена расчетному анализу развития внутренних напряжений в сварных соединениях из теплоустойчивых сталей в неравновесных условиях сварки и сравнительной оценке эффективности методов исследования РПН, основанных на испытании в различных режимах термомеханического воздействия.

Необходимым условием образования разрушения сварных соединений при повторном нагреве является наличие высокого уровня остаточных сварочных напряжений. Процесс развития внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях представляет собой сложное явление, определяемое распределением термической и фазовой дилатации при неравновесных условиях сварки. Расчетная оценка развития внутренних напряжений производилась с помощью численного решения задачи на ЭВМ с учетом неоднородности фазовой дилатации в различных зонах сварного соединения. Расчет проводился применительно к случаю сварки пластин из стали 15X2hMFA встык неплавящимся электродом и аустенитным электродом ЭА395/9 (ЮХ16Н25М6). В результате проведенного расчетного анализа была показана существенная роль как жесткости сварного соединения, так и состава прикладного материала на кинетику развития сварочных напряжений в отдельных зонах сварного соединения. Так, при сварке в зоне, непосредственно прилегающей к линии сплавления, при незначительной жесткости соединения развиваются сжимающие напряжения, с увеличением жесткости сварного соединения (ширины пластины) в этой зоне сжимающие напряжения переходят в растягивающие (рис.1). Таким образом показано, что в сталях данного класса существует критический уровень жесткости сварного соединения, ниже которого в наиболее опасной зоне в отношении образования РПН развиваются сжимающие напряжения. Это обстоятельство указывает на то, что в сварных соединениях такой жесткости образование разрушения при повторном нагреве исключено.

Применительно к исследованным условиям сварки существенные продольные остаточные напряжения возникают при ширине пластины свыше 20 см. Это обстоятельство обуславливает необходимость применения в качестве технологических проб пластин больших размеров,

что приводит к перерасходу металла.

В настоящей работе предложено сократить металлоемкость образцов за счет применения внешнеприложенных сил к испытываемому малогабаритному образцу (рис.2).

В малогабаритном образце, вследствие эффекта отражения, скорость охлаждения в околосварной зоне будет меньше, чем в сварных соединениях относительно больших размеров. Для создания термического цикла при сварке, обеспечивающего получение нестабильных структур, образец в процессе проплавления охлаждался через отверстие проточной водой. Для увеличения вероятности образования РПН, а также для ужесточения напряженного состояния на сварной образец перед испытанием наносился концентратор напряжения в виде прорези глубиной $h = 1,5$ мм и с радиусом в вершине $r = 1,0$ мм.

Для выбора наиболее эффективного характера термомеханического воздействия при исследовании склонности сварных соединений к РПН были произведены испытания в трех режимах: постоянно действующих внешних нагрузок; постоянной скорости деформирования; в условиях изотермической релаксации приложенных внешних нагрузок. Внешнее усилие во всех случаях прикладывалось по схеме трехточечного изгиба.

При реализации различных методов были спроектированы и изготовлены на базе существующих испытательных машин односекционные установки.

В результате проведенных испытаний в различных режимах термомеханического воздействия было установлено, что наиболее эффективным методом оценки склонности сварных соединений к РПН является метод, основанный на испытании сварных малогабаритных образцов в условиях изотермической релаксации напряжений. Этот метод обеспечивает наибольшую воспроизводимость результатов и упрощает обработку полученных данных.

При испытании в условиях релаксации приложенных напряжений в системе образец - машина задавался различный уровень потенциальной энергии путем изменения начального напряжения, приложенного к испытываемому сечению образца. Потенциальная энергия накапливалась за счет упругой деформации образца и упругих элементов нагружающей системы, включая динамометр. За критерий склонности материала к РПН принимается минимальное значение потенциальной энергии, обуславливающей разрушение образца. Эта энергия

при постоянной жесткости системы машина - образец может быть вырвана через начальный уровень приложенных напряжений. Жесткость нагружающей системы машина - образец определена экспериментальным таким образом, чтобы время разрушения испытываемых сталей составляло период, близкий к периоду их нахождения в заданном интервале температур в условиях после-сварочной термической обработки. Это время - время испытания сварных образцов было принято равным трем часам. Следует отметить, что определенный таким образом показатель сопротивляемости сварного соединения разрушению при повторном нагреве не изменяется при увеличении времени испытания до 15-20 часов.

Глава III. Посвящена анализу влияния технологических факторов на склонность сварных соединений из теплоустойчивых сталей к разрушению при повторном нагреве.

С целью уменьшения вероятности образования РПН в сварных конструкциях из теплоустойчивых сталей был произведен экспериментальный анализ влияния следующих технологических факторов на РПН: скорости охлаждения в ОШЗ сварного соединения в процессе сварки; химического состава присадочного материала; напыления металла шва и металла ОШЗ водородом; наличия механических концентраторов; температуры повторного нагрева; скорости нагрева сварного соединения при повторном нагреве.

Как показали проведенные исследования для сварных соединений из сталей 15Х2НМФА и 15Х1НФ с увеличением скорости охлаждения вероятность образования разрушения при повторном нагреве возрастает (показатель сопротивляемости РПН падает). Это обстоятельство можно объяснить тем, что с увеличением скорости охлаждения возрастает неравновесность состояния металла в ОШЗ, в результате чего при повторном нагреве будет происходить интенсивное дисперсионное упрочнение за счет выпадения мелкодисперсных карбидов Cr , Mo , V . А это приводит к значительному относительному разупрочнению границ зерен в сравнении с прочностью кристаллита.

Исследование влияния химического состава присадочного материала на РПН показало, что использование присадочного материала, который позволяет получить более мягкий шов, чем основной металл, значительно повышает сопротивляемость РПН сварного соединения. Так, при сварке теплоустойчивой стали 15Х2НМФА электродами ЭАЗ95/9 (10Х16Н25М6), УОНИ 13/55 (св.08) и 48Н23 (04НЗМД)

сопротивляемость РПН повышается в 1,5; 1,4; 1,3 раза, соответственно по сравнению с электродами такого же химического состава, как и основной металл. В зависимости от химического состава присадочного материала в ОШЗ будет иметь место различная степень аустенизации, а, следовательно, металл ОШЗ при сварке различными электродами будет иметь различную величину твердости. Так, при сварке аустенитными электродами ЭА395/9 металл ОШЗ претерпевает наименьшую степень аустенизации и твердость в этом случае наименьшая. При сварке электродами УОНИ ИЗ/55 наблюдается обратная картина.

Как показали проведенные нами исследования, чем выше величина твердости металла ОШЗ, тем больше склонность сварного соединения к разрушению при повторном нагреве.

При сварке в условиях энергичного насыщения металла шва и металла ОШЗ водородом необходимо учитывать, что сопротивляемость разрушению при повторном нагреве в этом случае снижается (рис. 3). И даже такие технологические операции как сварка с подогревом до $T = 300^{\circ}\text{C}$ и выдержка сварного соединения перед повторным нагревом более 20 суток не позволяет устранить вредное влияние водорода.

При повышении температуры происходит уменьшение количества диффузионноподвижного водорода в металле за счет выделения его в атмосферу. Но водород находится в металле не только в диффузионноподвижном состоянии. Значительная часть его адсорбируется на внутренних дефектах кристаллической решетки (дислокациях, межфазных поверхностях). По-видимому, этот водород перераспределяясь при повторном нагреве оказывает влияние на образование РПН в сварных соединениях. Применительно к анализу этого явления нами произведена расчетная оценка адсорбции водорода на дислокациях в процессе остывания сварного соединения.

Кинетика диффузии ионов водорода к дислокациям описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{A}{\Delta^2} \cdot D_0 \exp[-U/kT(u)] [C - C^p], \quad (1)$$

где A — константа, учитывающая взаимодействие ионов водорода с потенциальным полем дислокации;

Δ — параметр, определяющий протяженность диффузионной области;

D_0 — предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии;

U - энергия активации диффузии водорода;

$T(t)$ - термический цикл сварки;

C^p - равновесная концентрация водорода у дислокации.

Движущей силой процесса является разность равновесной и неравновесной концентрации водорода у дислокации.

Подставляя в уравнение (1) зависимость равновесной концентрации от температуры (по Мак-Лину) и преобразуя уравнение, получаем дифференциальное уравнение изменения концентрации водорода от температуры:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = -\frac{A}{\omega} \cdot \frac{D_0}{\Delta^2} \exp(-U/kT) \left[C - \frac{B C_M \exp(Q/kT)}{1 + B C_M \exp(Q/kT)} \right], \quad (2)$$

где Q - энергия взаимодействия водорода с дислокациями, принята в расчетах равной 55°O кал/моль;

B - константа, учитывающая вибрационную энтропию, в расчете принята равной 1;

C_M - концентрация водорода в матрице.

Значения концентраций водорода в матрице (C_M) определяются из решения дифференциального уравнения, учитывающего макроскопическое перераспределение водорода вследствие выравнивающей диффузии и термодиффузии в неравновесных условиях сварки.

Уравнение (2) решалось численным методом Рунге-Кутты на ЭЦМ "Минск-32".

В результате проведенного расчетного анализа показано, что неравновесные значения концентрации водорода приближаются к равновесным значениям в области низких температур. Следовательно, дислокации к концу термического цикла и началу следующей выдержки насыщены водородом почти до равновесных концентраций. Таким образом, к моменту полного охлаждения значительная часть водорода находится в адсорбированном на дислокациях состоянии. При повторном нагреве неравновесная концентрация остается выше равновесных значений. Это избыточное значение концентрации водорода, сконцентрированного на границе кристаллита, может способствовать межкристаллическим разрушениям при повторном нагреве.

Наличие концентраторов напряжений в сварных соединениях снижает его сопротивляемость РПН. Так, концентратор в виде проresi с радиусом в вершине 1,5 мм снижает показатель сопротив-

ляемости РПН в 1,5 раза.

Проведенные исследования влияния температуры повторного нагрева на РПН сварных соединений из стали 15Х2НМФА и 15ХН1Ф показали, что температурный интервал образования разрушения находится в области $T=500-600^{\circ}\text{C}$ для стали 15Х2НМФА и для стали 15ХН1Ф — $T=500-650^{\circ}\text{C}$.

В результате исследования влияния скорости нагрева образца при повторном термическом воздействии на РПН было установлено, что она не влияет на показатель РПН при нагреве до нижней границы образования разрушения (для стали 15Х2НМФА до $T=500^{\circ}\text{C}$ и для стали 15ХН1Ф до $T=500^{\circ}\text{C}$). Так, при увеличении скорости нагрева от $\omega = 30$ град/час до $\omega = 500$ град/час показатель сопротивляемости РПН не изменяется.

Глава IV. Содержит результаты исследования образования трещин при повторном наложении валика аустенитной проволокой на поверхность теплоустойчивой стали, анализ влияния перераспределения остаточных сварочных напряжений в процессе повторного нагрева на РПН и механизм образования разрушения при повторном нагреве.

Трещины при наложении плакирующей наплавки образуются в ОШЗ основного металла. Характер разрушения является исключительно межкристаллическим и располагаются трещины, как правило, под строго определенным углом ($45-90^{\circ}$) к продольной оси шва. Трещины под плакирующей наплавкой образуются в процессе необратимых деформаций при релаксации остаточных напряжений как в процессе наплавки, так и в процессе послесварочной термической обработки.

В процессе нанесения плакирующего слоя при наложении последующего валика в условиях, когда зона сплавления предыдущего валика попадает в область, нагреваемую последующим валиком до температур $T=400-700^{\circ}\text{C}$, в ней протекают следующие процессы. При наложении первого валика на этапе охлаждения в ней возникают растягивающие напряжения и формируется закалочная структура. При наложении второго валика в этой зоне вначале происходит разгрузка, но небольшая, а затем, с температур $T=700-800^{\circ}\text{C}$, развиваются пиковые значения растягивающих напряжений.

Таким образом, закаленная зона на этапе нагрева подвергается старению в условиях разгрузки или некоторого развития сжимающих напряжений, а на этапе охлаждения эти зоны стареют в условиях интенсивного растяжения.

Для воспроизведения в лабораторных условиях этого вида разрушения разработана методика испытаний. Имитация этого вида дефекта производилась при наплавке двух параллельных валиков на образец. Разрушение возникало в зоне сплавления первого (аустенитного) шва при наложении второго валика. Необходимый для образования трещины уровень напряжения в испытываемом сечении образца задавался с помощью внешнего усилия, прикладываемого к образцу перед укладкой второго валика. Испытания проводились в режиме релаксации приложенных напряжений. В результате проведенных исследований образования поднаплавочных трещин в сварных соединениях из стали 15Х2НМФА был установлен температурный интервал образования разрушения, который равен $T=400-600^{\circ}\text{C}$. За показатель сопротивляемости металла ОШЗ разрушению при повторном наложении валика при имелся расход потенциальной энергии, при котором в сварном соединении возникало разрушение (эта величина задавалась значением начальных напряжений).

На разрушение сварных соединений при повторном нагреве существенное влияние оказывают как микропроцессы, так и процессы, развивающиеся в макроскопических объемах сварного соединения. В этом плане существенно влияние характера перераспределения внутренних напряжений первого рода при повторном нагреве сварных соединений из теплоустойчивых сталей. В процессе повторного нагрева степень релаксации напряжений в разных зонах сварного соединения будет зависеть от релаксационной стойкости материала этих зон. Экспериментально установлено, что различные зоны сварного соединения в зависимости от максимальной температуры нагрева в процессе сварки имеют различную релаксационную стойкость (рис. 4). Расчетный анализ распределения продольных остаточных напряжений показал, что в зоне растягивающих напряжений находятся участки металла с различной релаксационной стойкостью. Это приводит при повторном нагреве к тому, что релаксация напряжений развивается во всех зонах с различной интенсивностью. В волокнах, нагреваемых выше $T=1350^{\circ}\text{C}$ релаксация напряжений будет протекать менее интенсивно, чем в волокнах, нагреваемых ниже $T=1000^{\circ}\text{C}$. Имея ввиду, что при значительной жесткости сварного соединения волокна ОШЗ, нагреваемые до $T=800^{\circ}\text{C}$, испытывают растягивающие напряжения можно заключить, что преимущественная релаксация в них внутренних напряжений будет способствовать подгрузке волокон с большей релаксационной

стойкостью. Это обстоятельство приводит к увеличению вероятности образования РПН у зоны сплавления, что и наблюдается на практике.

Существенное влияние на РПН в ОШЗ оказывают также дилатационные эффекты, связанные с отпускком закаленных участков. Вследствие того, что волокна, различно удаленные от зоны сплавления, испытывают различную степень закалки их отрицательная дилатация при отпуске будет различна. Наибольшую степень закалки, а, следовательно, и наибольшую отрицательную дилатацию, испытывают участки металла, непосредственно прилегающие к линии сплавления. Отрицательная дилатация при отпуске приводит к возрастанию напряжений. Оба рассмотренные процессы, затрудняющие релаксацию напряжений у зоны сплавления способствуют развитию РПН в этой области.

ВЫВОДЫ

1. В работе проведены исследования, имеющие целью разработку методики испытания сварных соединений из теплоустойчивых сталей к разрушению при повторном нагреве (РПН) на малогабаритных образцах.

2. Расчетным путем показано, что в малогабаритных образцах теплоустойчивых сталей зона закалки подвержена остаточным сжимающим напряжениям, что исключает РПН в условиях последующей термообработки.

Это привело к выводу о возможности определения сопротивления разрушению при повторном нагреве путем испытания малогабаритных образцов в условиях дополнительного нагружения внешне-приложенными силами.

3. В работе рекомендован новый тип образца для испытания, позволяющий в широких пределах изменять термический цикл сварки за счет охлаждения ОШЗ проточной водой и другими средами.

4. Для отработки эффективной методики испытания склонности материала к РПН образцы подвергались трем видам нагружения:

- а) нагружение в режиме постоянно действующих напряжений;
- б) нагружение в режиме постоянной скорости деформирования;
- в) нагружение в режиме изотермической релаксации напряжений.

Во всех случаях были получены межкристаллические разрушения в одном и том же температурном интервале ($T = 500-600^{\circ}\text{C}$), что, в принципе, допускает применение всех трех видов нагружения для

исследования образования РПН.

5. Сопоставление методов исследования, основанных на испытании в различных режимах термомеханического воздействия показало, что метод испытания в режиме изотермической релаксации напряжений является наиболее эффективным в отношении воспроизводимости результатов и простоты обработки экспериментальных данных при исследовании сопротивляемости сварных соединений разрушению при повторном нагреве.

Для количественной оценки сопротивляемости материала разрушению предложен показатель, выраженный минимальной начальной упругой энергией, необходимой для зарождения разрушения. Эта величина задается значением начальных напряжений.

6. Проведенные исследования влияния технологических факторов на РПН позволили установить следующие закономерности:

а) применение присадочного материала, обеспечивающего более мягкий шов по сравнению с основным металлом и наименьшую степень закалки металла ОШЗ (например, присадочный металл О4НЗМД), существенным образом повышает сопротивляемость сварного соединения РПН;

б) повышение содержания в металле водорода отрицательно влияет на сопротивляемость сварных соединений теплоустойчивых сталей РПН. Расчетный анализ показал, что часть абсорбированного водорода при нагреве до температур $T = 500-600^{\circ}\text{C}$ сохраняется в объеме металла за счет его адсорбции на дислокациях. При развитии локальной пластической деформации у границ зерен водород может транспортироваться дислокациями в приграничные области, понижая сопротивляемость металла межзеренному разрушению;

в) увеличение скорости охлаждения сварных соединений приводит к снижению сопротивляемости материала РПН.

7. Установлено, что при отжиге сварных конструкций для снятия остаточных напряжений происходит подгруппирование металла зоны с наибольшей релаксационной стойкостью за счет усиленной релаксации в областях с малой релаксационной стойкостью. Зона с максимальной релаксационной стойкостью является зоной, в которой возникает РПН. Таким образом, неравномерность развития процессов релаксации внутренних напряжений является дополнительным энергетическим источником разрушения.

8. Установлено, что в процессе повторного нагрева происходит отрицательная дилатация закаленных участков ОШЗ, в резуль-

тате чего зона разрушения претерпевает дополнительное подгружение.

9. Спроектирована и изготовлена многосекционная установка для исследования склонности сварных соединений к РПН в режиме изотермической релаксации напряжений.

10. Предложен и исследован ряд малогабаритных сварных проб применительно к оценке склонности сварных соединений из элементов относительно больших толщин к разрушению при повторном нагреве.

Малогабаритные пробы осуществлены при использовании дополнительного нагружения сварных элементов реактивными моментами в процессе печного нагрева.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Прохоров Н.Н., Дризов В.С., Шабалина Н.Н. Исследование разрушения сварных соединений в процессе изотермической релаксации напряжений. В сб. тезисов докладов научно-технической конференции "Сварка жаропрочных материалов", Омск, 1978, II-14.
2. Прохоров Н.Н., Дризов В.С., Шабалина Н.Н. Разрушение сварных образцов малых размеров при повторном нагреве в различных режимах термомеханического воздействия. "Сварочное производство", 1980, № I, с.3-5.
3. Прохоров Н.Н., Дризов В.С., Шабалина Н.Н., Влияние технологических факторов на разрушение сварных соединений из теплоустойчивых сталей типа 15X2НМФА при повторном нагреве. Экспрессинформация. Серия "Сварочные работы", Информэнерго, вып. II, 1979, с.8-II.

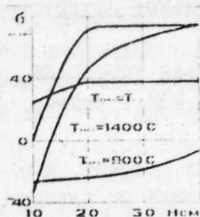


Рис. 1. Влияние ширины пластины на распределение остаточных напряжений для случая сварки пластин из стали 15X2HMF аустенитным электродом. (Числа на кривых - максимальная температура нагрева при сварке)

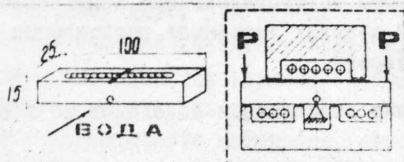


Рис. 2. Малогабаритный сварной образец для исследования РПН

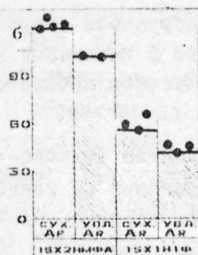


Рис. 3. Влияние повышенного содержания водорода в металле на сопротивляемость сварных соединений из теплоустойчивых сталей разрушению при повторном нагреве

Рис. 4. Релаксация напряжений, приложенных к образцам из стали 15X2HMF. (Числа на кривых - максимальная температура нагрева образцов при имитации термического цикла)

