

1566802

На правах рукописи

УДК 621.791.019

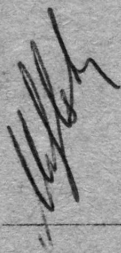
МУЧИЛО ФЕДОР МИХАЙЛОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗОВАНИЮ
КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИЙ
ТОЛЩИНОЙ ДО 1,5 ММ ИЗ ГОМОГЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ
СТАЛЕЙ**

Специальность: 05.03.06 – Технология и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва, 2000



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им Н.Э. Баумана.

Научный руководитель — к.т.н., доцент Б.Ф. Якушин

Официальные оппоненты — д.т.н., профессор Т.А. Чернышова
к.т.н., доцент А.И. Мисюров

Ведущее предприятие — ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара

Защита состоится «22» июня 2000 г. на заседании диссертационного совета К053.15.03. в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок: (095) 267-0963.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,

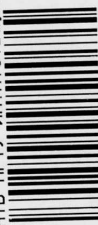
библиотеке МГТУ им. Н.Э.

2000 г.

В.И. Гирш

1566802

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1566802

Повышение сопр
мучило ф.и.м.

Заказ № 79г

Типография МГТУ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Гомогенные аустенитные стали нашли широкое применение в энергетической и химической промышленности. Одной из проблем, возникающих при изготовлении элементов теплоэнергетических, химических и атомных установок, является возникновение кристаллизационных трещин при сварке. В настоящее время разработано большое количество металлургических и технологических способов, позволяющих повысить в процессе сварки сопротивляемость материала их образованию. Однако при однопроводной сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов тонколистовых изделий применение многих способов ограничено особенностями конструкции, технологии изготовления и требованиями эксплуатации к изделию. Это заставляет формировать свойства материала, определяющие его сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин, на этапах, предшествующих сварке. Речь идет о технологической наследственности — проявлении у свариваемого изделия свойств, значимых для формирования сварного соединения и приобретенных в результате специфики организации предшествующих технологических операций при производстве материала, получении заготовки и сборки.

Эксплуатационные требования определяют химический состав стали и ее структуру, что ограничивает возможности их варьирования. Технология изготовления конструкций из гомогенных аустенитных сталей предусматривает, как правило, стабилизирующую термообработку после сварки. Это позволяет варьировать структуру сварной заготовки в рамках, определяемых требованиями к заготовке и технологией ее изготовления. Одним из перспективных способов борьбы против образования кристаллизационных трещин, возникающих при однопроводной сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов, является рационализация исходной структуры заготовки.

Цель работы. Повысить сопротивляемость гомогенных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин при однопроводной сварке

неплавящимся электродом в среде инертных газов путем рационализации исходного состояния, полученного холодной деформацией.

Методы исследования. Сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин — ЛТП-6 (ВНИИНМ). Макротвердость — ГОСТ 9013-59 на твердомере модели ТК-2М, микротвердость — ГОСТ 9450-76 на ПМТ-3. Величину зерна определяли методом измерения длин хорд (ГОСТ 5639-82), микроскоп Неофот-21; количество α -фазы — переносным α -фазометром магнитного типа. Предложена методика дифференцирования участков материала с различным искажением структуры по показателю — твердость.

Научная новизна состоит в раскрытии механизма влияния исходной структуры гомогенных аустенитных сталей, полученной холодной деформацией, на их сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин при сварке. Установлено, что:

- максимальной сопротивляемостью образованию кристаллизационных трещин обладает структура шва, формируемая на подложке, состоящей из разориентированных, мелких зерен (G8 и G9, в соответствии с ГОСТ 5639-82). Такая структура подложки возникает в исходной структуре металла с твердостью $33 \pm 3 \text{HRC}$ (08X18H10T) и $28,5 \pm 3,5 \text{HRC}$ (06X16H15M3Б) в результате доминирования, под воздействием термо-деформационного цикла сварки, процесса первичной и собирательной рекристаллизации;

- с увеличением твердости выше $33 \pm 3 \text{HRC}$ (08X18H10T) и $28,5 \pm 3,5 \text{HRC}$ (06X16H15M3Б) стойкость против образования кристаллизационных трещин снижается в результате повышения темпа деформации при сварке из-за увеличения жесткости конструкции;

- низкая сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин гомогенных сталей с аустенизированной структурой и исходной структурой с твердостью до $28,5 \pm 3,5 \text{HRC}$ объясняется формированием, в результате протекания процессов полигонизации, собирательной и вторичной рекристаллизации при термо-деформационном цикле сварки, крупнозернистой, неодно-

родной структуры, которая является подложкой для растущих кристаллитов шва;

- одним из информативных показателей искажения структуры является твердость, так как из-за большого количества факторов, влияющих на формирование структуры при холодной деформации, степень деформации не определяет ее однозначно.

Практическая ценность. Разработана методика, позволяющая дифференцировать структуры с различным искажением по показателю — твердость. Установлена количественная зависимость сопротивляемости гомогенных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин при односторонней сварке неплавящимся электродом от исходного состояния, полученного холодной деформацией, и режима сварки. Даны рекомендации по осуществлению входного контроля свариваемых заготовок, назначению режимов сварки и выбору исходной структуры. Создана и находится на этапе внедрения испытательная машина для определения показателей сопротивляемости материала образованию горячих трещин.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на научном семинаре кафедры "Технология сварки и диагностики" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и приложений, выполнена на 111 машинописных листах, содержит 63 рисунка, 10 таблиц и 108 наименований литературных источников.

Краткое содержание работы

Глава 1. Согласно современному представлению о механизме образования кристаллизационных трещин, базирующемуся на теории проф. Н.Н.Прохорова и получившему дальнейшее развитие в работах М.Х.Шоршорова, Б.И.Медовара, Ю.И.Казеннова, Т.А.Чернышовой, Б.Ф.Якушина, сопротивляемость материала образованию кристаллизацион-

ных трещин определяется следующими показателями: а) температурным интервалом хрупкости (ТИХ); б) минимальной пластичностью в ТИХ; в) темпом деформации при сварке. Все методы борьбы с кристаллизационными трещинами направлены на улучшение этих показателей, которого можно добиться путем изменения термо-деформационных условий кристаллизации шва и технологических свойств материала. Особенности конструкции, технологии производства и требования эксплуатации изделия накладывают ограничения на выбор методов борьбы с кристаллизационными трещинами.

В работах Н.Н.Прохорова, М.Х.Шоршорова, Т.А.Чернышовой, М.М.Нероденко выявлено наследование растущими кристаллитами сварочной ванны размеров и кристаллографической ориентации оплавленных зерен подложки. Ю.И.Казеннов экспериментально определил зависимость между размером зерна основного металла и сопротивляемостью стали 03X16H15M3B образованию кристаллизационных трещин. Малый объем сварочной ванны и возможность создания однородной по толщине структуры дают основания предположить, что фактор — исходная структура — оказывает существенное влияние на стойкость тонкостенных конструкций из гомогенных аустенитных сталей против образования кристаллизационных трещин.

Структуру подложки формируют процессы, происходящие в основном металле при сварочном нагреве и направленные на термодинамическую стабилизацию его состояния. Механизм их протекания и полнота завершения зависят от исходной термодинамической неустойчивости структуры и режима сварки. Холодная пластическая деформация, широко применяемая при изготовлении тонкостенных изделий, значительно искажает структуру материала, что делает ее нестабильной. Условия поставки, предъявляемые к изделиям, полученным холодной деформацией, в том числе местной, ограничиваются в основном требованиями к отклонению геометрических размеров, оставляя широкий диапазон для варьирования степени искажения структуры.

В настоящее время имеются данные о положительном влиянии предварительной холодной деформации на сопротивляемость гомогенных аустенитных сталей образованию горячих трещин, однако ввиду сложности процессов, протекающих при сварке холоднодеформированного металла, однозначных рекомендаций по ее применению нет.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы необходимо решить следующие задачи:

- выявить факторы, определяющие сопротивляемость гомогенных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин, и установить возможность их дифференцированной оценки;
- разработать методику оценки и дифференцирования структур, полученных холодной деформацией с различным суммарным обжатием;
- выбрать метод оценки сопротивляемости гомогенных аустенитных сталей с различным исходным структурным состоянием образованию горячих трещин;
- экспериментально выявить влияние исходной холоднодеформированной структуры на сопротивляемость гомогенных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин и разработать рекомендации по ее использованию.

Глава 2. Идея работы основана на использовании фактора наследственности и заключается в создании в шве структуры, обладающей высокой сопротивляемостью образованию кристаллизационных трещин, путем формирования мелкозернистой, разориентированной структуры на линии сплавления.

Гомогенные аустенитные стали можно разделить на две группы: а) однофазные стабильноаустенитные стали, типа Х16Н15МЗБ, б) содержащие в своем составе ферритную (до 8%) фазу (Х18Н10Т). Кристаллизация сталей типа Х18Н10Т протекает с выпадением двух фаз — аустенита и феррита, что может значительно измельчить структуру шва. Это позволяет предположить,

оценки технологической прочности кристаллизующегося металла шва машинные методы испытания можно разделить на две группы: первая группа — методы, использующие в качестве показателя оценки скорость деформации, при которой в образце образуется кристаллизационная трещина (ЛТП, ИМЕТ, PVR), вторая группа — методы, использующие в качестве показателя максимальную длину трещины, суммарную длину трещин при определенной степени деформации (Varestraint). Принципиальная разница между этими методами заключается в наличии или отсутствии связи между критерием оценки и термо-деформационными условиями, возникающими в образце при испытании. Для методов первой группы скорость деформации является, с одной стороны, критерием испытания, с другой — параметром испытания, варьируя который (при постоянном режиме сварки), изменяют условия деформации образца, а возникновение в образце критических термо-деформационных условий определяют по факту появления кристаллизационной трещины. Критерий второй группы методов - суммарная длина трещин - определяет область, где возникли условия для образования трещины.

Различный физический смысл критической скорости деформации и суммарной длины трещин, их интегральная оценка технологической прочности дают основания предположить различную чувствительность методов к образованию кристаллизационных трещин. Для выбора метода испытания необходимо было провести сравнительные исследования на сплавах с близким химическим составом по следующим критериям: 1) воспроизводимость условий испытаний при проведении параллельных наблюдений и чувствительность метода на отклонения в условиях испытания; 2) адекватность условий испытаний реальным условиям сварки тонколистового материала. Исследования были проведены на четырех NiCrFe-сплавах в рамках международной программы сравнения методов испытания. Оценка результатов испытания показала, что чувствительность и однозначность оценки по методам первой группы выше, чем по второй. Для первой группы она определяется в

основном возможностью испытательного оборудования поддерживать выбранные параметры испытания с заданной точностью. Для методов второй группы характерно отсутствие однозначной оценки технологической прочности каждого сплава. Вероятнее всего, это связано со значительным влиянием основного материала на формируемые в образце термодеформационные условия и высокой чувствительностью критерия оценки к этому влиянию.

Для оценки сопротивляемости гомогенных аустенитных сталей с различным исходным состоянием образованию горячих трещин был выбран метод ЛТП-6, модифицированный во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, который по сравнению с другими методами первой группы обладает следующими преимуществами: а) позволяет ввести дополнительный критерий оценки — суммарная длина трещин; б) позволяет осуществлять сравнение влияния исходного состояния с влиянием других факторов путем прямого сравнения результатов эксперимента на основании накопленного во ВНИИНМ большого статистического материала по исследованию гомогенных аустенитных сталей.

Для зоны сплавления характерна разнотекстурированная структура, поэтому метод металлографического анализа должен оценивать величину зерна и степень разнотекстурности. Из всех методов, описанных в ГОСТ 5639-82, наиболее информативным и достоверным является метод измерения длин хорд.

Глава 4. Исследования проводили на 08X18H10T и 06X16H15M3Б. Химический анализ показал, что химический состав заготовок полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ 5632-72, а содержание нерегламентируемых вредных примесей, таких как олово, свинец, сера и т.п., незначительно и, вероятнее всего, не будет ощутимо повышать склонность материала к образованию кристаллизационных трещин.

Партия образцов имеет одинаковую структуру, если она принадлежит одной объединенной группе, которая описывается, как нормально распре-

погонной энергией содержание феррита в шве статистически одинаково для всех групп и составляет 1,9%, содержание феррита в ОШЗ в зависимости от группы уменьшилось на 50...90%. Такое распределение феррита позволяет объяснить следующие факты: а) для режима с максимальной погонной энергией разница между максимальным и минимальным значениями показателя сопротивляемости составляет 20%, что объясняется наличием 2,4...3,5 % α -фазы в шве; б) режиму с максимальной погонной энергией соответствуют значения показателя сопротивляемости большие, чем для режима с минимальной погонной энергией, что связано с уменьшением содержания α -феррита в шве и увеличением содержания феррита в ОШЗ, который упрочняет основной металл.

Фактор предварительной холодной деформации в различных условиях оказывает различное влияние на сопротивляемость однородных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин. Так, при сварке сталей типа Х16Н15МЗБ влияние предварительной холодной деформации сопоставимо с влиянием технологии выплавки. Разброс значений при варьировании степени наклепа составил 40% (при варьировании способа выплавки 30%), что не может не учитываться при разработке технологии сварки. Для сталей типа Х18Н10Т степень влияния зависит от режима сварки, поэтому, если технология изготовления изделия не учитывает структуру сварной заготовки, необходимо назначать режим с максимальной (для данного изделия) погонной энергией.

Глава 5. Разработаны рекомендации по применению предварительной холодной деформации для повышения технологических и эксплуатационных свойств однородных аустенитных сталей. Исходное структурное состояние образца влияет на сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин. Поэтому необходимо организовать входной контроль структуры поступающих после холодной деформации сварочных заготовок по критерию — макротвердость. В зависимости от назначения конструкции входной кон-

троль может быть как сплошным, так и выборочным. При уровне достоверности 0,05 количество измерений твердости на начальном этапе можно принять равным шести; по мере накопления статистических данных оно может уточняться.

Предварительная холодная деформация также оказывает влияние на сопротивляемость образованию горячих трещин в ОШЗ и эксплуатационные свойства. Поэтому при разработке технологии необходимо проводить дополнительные испытания, связанные с оценкой степени такого влияния. Для этой цели создана и находится на этапе внедрения испытательная машина МИС-3 с компьютерным управлением. Особенностью данной машины по сравнению с другими испытательными машинами серии МИС являются малые габариты, что позволяет использовать ее при испытании облученного материала в горячих камерах, и улучшенная интерактивная система управления, которая дает возможность поддерживать термические циклы различной сложности с точностью $\pm 3^\circ$. Тем самым достигается высокая воспроизводимость термических циклов от испытания к испытанию.

Общие выводы и рекомендации

1. Применение многих способов повышения сопротивляемости гомогенных аустенитных сталей образованию кристаллизационных трещин ограничено при односторонней сварке неплавящимся электродом в среде инертных газов. Поэтому одним из перспективных направлений является изменение структуры материала на этапах, предшествующих сварочному, с целью формирования свойств, оказывающих влияние на формирование сварного соединения. Для гомогенных аустенитных сталей одним из наиболее эффективных и распространенных способов изменения структуры является холодная пластическая деформация.

2. Информативным критерием оценки структуры является твердость, так как она позволяет дифференцировать степень искажения структуры и равномерность распределения искажений. В соответствии с принятым критерием разработана методика, которая на основе статистического анализа определяет

структуру материала.

3. Сравнительный анализ методов испытания материала на сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин показал, что предпочтительнее использовать методы типа ЛТП, PVR, ИМЕТ, так как условия испытания по этим методам в большей степени соответствуют условиям сварки и чувствительность показателя — критическая скорость деформации — позволяет дифференцировать сплавы с близкими химическими составами. Для оценки влияния исходного состояния выбран метод ЛТП 1-6, модифицированный во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. Он позволяет ввести дополнительный критерий — суммарная длина трещин при критической скорости деформации. Для этого метода существует банк данных по испытаниям гомогенных аустенитных сталей, что дает возможность делать выводы о степени влияния исходного состояния на основе прямого сравнения.

4. Для стали типа X18N10T одной степени суммарного обжата соответствует несколько статистически различных по твердости исходных структур, что связано с выпадением α' -фазы в процессе деформации.

5. Установлено, что зависимость сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин от исходного состояния имеет для стали 06X16N15M3Б максимум, который соответствует исходному состоянию с твердостью $28,5 \pm 3,5$ HRC, что связано с преобладанием в основном металле при сварочном нагреве первичной и собирательной рекристаллизации. В результате этого на линии сплавления формируется мелкозернистая, разориентированная структура, которая является подложкой для растущих кристаллитов. Резкое снижение показателя для групп с высокой твердостью вызвано увеличением темпа деформации в шве из-за увеличения жесткости образца.

6. Зависимость сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин от исходного состояния для стали 08X18N10T имеет характер, аналогичный таковой для стали 06X16N15M3Б. Однако максимальное значение показателя соответствует нескольким группам. Это связано с выделением в процессе кристаллизации α -фазы, которая значительно увеличивает сопро-

тивляемость образованию кристаллизационных трещин. Различием в количестве феррита в шве для различных режимов объясняется меньшее значение критической скорости деформации для режима с минимальной погонной энергией сварки.

7. Для сталей типа Х16Н15М3Б фактор — исходное состояние — влияет на сопротивляемость образованию кристаллизационных трещин наравне с фактором — способ выплавки, что должно учитываться при разработке технологии. При изготовлении ответственных конструкций из сталей типа Х18Н10Т с неизвестным исходным состоянием необходимо назначать режим с максимальной (в пределах технологии сварки) погонной энергией сварки.

8. Для учета фактора — исходное состояние — рекомендовано организовывать входной контроль поступающих заготовок по критерию "твердость" (HRC): а) сплошной — при сварке ответственных конструкций; б) выборочный — при сварке конструкций неответственного назначения. Минимальное количество замеров твердости равно шести.

9. Для исследования влияния исходного состояния на сопротивляемость гомогенных аустенитных сталей образованию горячих трещин в твердой фазе и на эксплуатационные свойства сварного изделия рекомендована испытательная машина с компьютерным управлением МИС-3, которая создана и находится на этапе внедрения во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара.

Результаты работы изложены:

1. Якушин Б.Ф., Мучило Ф.М. Влияние наклепа на свариваемость аустенитных сталей, применяемых в атомной технике// Современные проблемы сварочной техники: Тез. докл. Всерос. научно-технической конф. – Воронеж, 1997. – С.21-22.

2. Якушин Б.Ф., Мучило Ф.М. Влияние исходного состояния на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке// Сварочное производство. – 1997. - №11. – С.22-24.

3. Yakushin B.F., Muchilo F.M. Effect of the initial condition of metal on hot cracking resistance in welding// Welding International- 1998- №12(6) - P.468-470



Рис. 1. Распределение образцов по структуре (06X16H15M3Б)

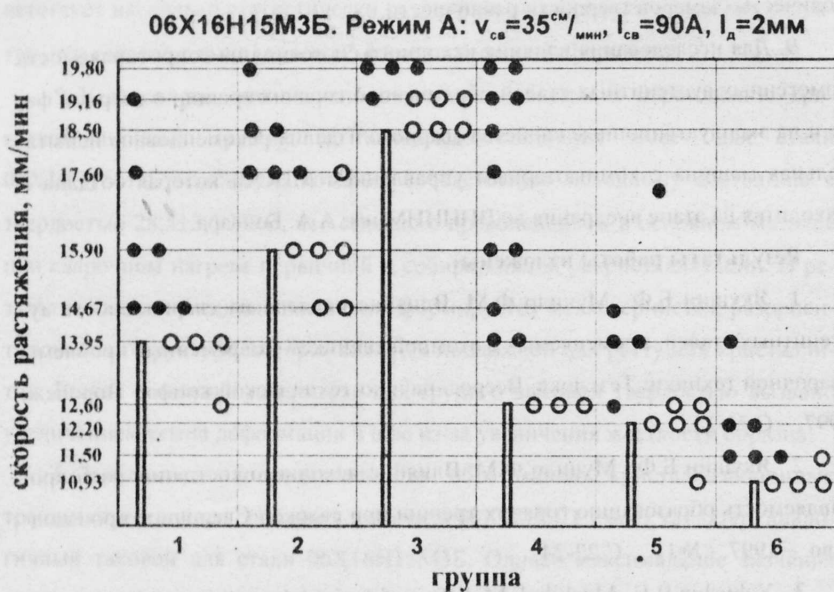


Рис. 2. Результаты испытания по методу ЛТП 1-6 (ВНИИНМ)