

1545529

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

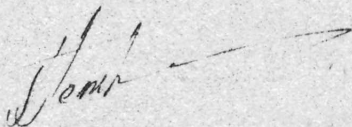
ПЕТРОВ Павел Юрьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА СКЛОННОСТЬ ДЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ К ОБРАЗОВАНИЮ "ХОЛОДНЫХ" ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА - 1994

Работа выполнена в Московском Ордена Ленина, Ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель - проф., д.т.н. МАКАРОВ Э.Л.
Официальные оппоненты - проф., д.т.н. ВЕРШИНСКИЙ А.В.
- доц., к.т.н. ВОРОНИН Н.Н.
Ведущее предприятие - ВНИИЖТ

Защита состоится "15" сентя 1994г. на заседании диссертационного совета К053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:

107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "9" сентя 1994г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент


В.И. ГИРШ

Подписано к печати 31.05.94 . Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ N 341 Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

1545529

Актуальность проблемы. Одним из наиболее опасных дефектов при сварке легированных сталей являются "холодные" трещины (ХТ). В результате многочисленных исследований было установлено, что основными факторами, описывающими образование ХТ, являются структура, диффузионный водород и напряженно-деформированное состояние (НДС). В работах, проведенных отечественными и зарубежными учеными-сварщиками и материаловедцами, подробно изучен вопрос образования структуры при сварке и ее влияния на склонность металла к образованию ХТ. Анализ распределения диффузионного водорода посвящены также многочисленные расчетные и экспериментальные работы. Таким образом, если влияние первых двух факторов на склонность металла к образованию ХТ теоретически проработано и экспериментально установлено, то влияние параметров НДС не изучено в достаточной мере. Поэтому исследование влияния отдельных параметров НДС на образование ХТ и разработка соответствующей методики их расчета является актуальной научной проблемой.

Целью работы являлось обеспечение технологической прочности при сварке/наплавке на основе разработки методики оценки влияния НДС на образование "холодных" трещин.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя аналитический метод определения температурного поля в сварном соединении, метод конечных элементов (МКЭ) для расчета временных и остаточных НДС в сварочной технологической пробе, методы теории подобия и моделирования, методы статистического анализа.

Экспериментальные методы использовались для оценки достоверности результатов расчета, установления сочетания геометрических размеров сварного соединения (СС) и параметров режима сварки, приводящих к образованию "холодных" трещин, а также определения расположения очага образования ХТ.

Научная новизна работы. В результате проведенных исследований установлено:

- 1) для описания условий возникновения ХТ необходимо анализи-



ровать НДС первого рода в зоне возможного их образования (шов и ЗТВ) с определением наиболее значимых его параметров, наиболее информативно характеризующих условия образования трещин:

- максимального значения объемности напряженного состояния (ОНС), которое предопределяет место расположения очага зарождения трещины;

- величины растягивающего напряжения в зоне этого очага, нормального к линии сплавления, определяющие возможность возникновения и направление развития ХТ;

- 2) ориентация наибольших главных напряжений в зоне с максимальной ОНС различна в пространстве, зависит от геометрических размеров ОС и при ширине пластины 50 мм они практически всегда перпендикулярны линии сплавления ($\sim 70^\circ$), а при ширине 200 мм - параллельны ей ($\sim 70^\circ$).

Практическая ценность работы:

1. Разработаны математические модели, алгоритмы и программы, позволяющие:

- рассчитать температурное поле в сварном соединении, а также геометрические размеры шва и ЗТВ, на основе оригинальной методики расчета положения источника тепла при использовании аналитических зависимостей;

- определить величину и направление главных напряжений и деформаций, а также объемность напряженного состояния;

- представить результаты расчета для визуализации в системе AutoCAD.

2. Получены зависимости влияния геометрических размеров жестко закрепленных элементов ОС на среднеинтегральные по толщине пластины и высоте шва наибольшие главные напряжения, применительно к технологической пробе из стали типа 30ХГСА.

3. Разработана методика оценки влияния НДС на образование "холодных" трещин при сварке/наплавке, предусматривающая комплексный анализ влияния конструкционных и технологических факторов.

4. Определены условия возможного возникновения ХТ при наплавке гребней колес железнодорожного транспорта от поверхности катания к вершине гребня и параметры термической обработки, предотвращающие трещинообразование.

Апробация работы. Основные результаты данной работы были рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э.Баумана (25.06.93)

Объем и структура работы. Диссертация состоит из четырех глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 41 рисунок, 14 таблиц и 137 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Дано обоснование актуальности выполненного исследования влияния НДС на трещинообразование и представлены основные положения, вынесенные на защиту.

Глава 1. Влияние напряженно-деформированного состояния на образование "холодных" трещин в сварных соединениях из легированных сталей

Проведенные разносторонние исследования позволили установить, что "холодные" трещины являются особым видом хрупкого межкристаллитного замедленного разрушения "свежезакаленной" стали при сварке и термообработке. Разрушение наступает под действием постоянного нагружения, приложенного непосредственно после термического воздействия в течение 15..20 часов.

Установлены следующие основные факторы, обуславливающие образование ХТ: структура с наличием закалочных составляющих, диффузионный водород и НДС в сварном соединении. Закаленная структура и водород определяют свойства металла ОС и являются достаточным условием для потенциальной склонности к образованию "холодных" трещин. НДС - необходимым условием возникновения трещин. Однако, на сегодняшний день отсутствуют данные о влиянии различных параметров НДС на трещинообразование. Поэтому для дальнейшего исследования условий образования ХТ необходим комплексный анализ отдельных параметров НДС, конструктивных и технологических факторов, влияющих на этот процесс.

По мере накопления значительного объема информации об условиях образования ХТ в реальных конструкциях, технологических пробах и в образцах при "машинных" испытаниях их различных классов и марок сталей были разработаны расчетные методы анализа трещинообразования. К ним относятся методы, позволяющие предварительно оценить склонность стали к образованию ХТ, а именно эквивалент углерода и параметр трещинообразования (R_n), предложенный Х.Сузуки. "Критериальный" метод, предложенный и разрабатываемый под руководством Макарова Э.Л., предполагает сравнение рассчитанных и определенных экспериментально параметров (концентрация диффузионного водорода, структура, диаметр зерна, напряжения в зоне разрушения и т.д.), обуславливающих образование ХТ. Эти методы позволяют установить возможность образования ХТ без анализа локальных условий трещинообразования, в частности уровня и соотношений параметров НДС.

Анализ расчетных методов, с позиций возможности их применения в исследовании процессов при сварке, позволяет сделать вывод, что для сложной конфигурации СС, из-за неравномерного распространения теплового потока, анизотропности различных зон соединения при изучении образования НДС наиболее желательно использовать численные методы, в частности конечных элементов.

Конечной целью анализа НДС в сварной конструкции является возможность предсказания разрушения материала, в том числе образования "холодных" трещин на основе анализа расчета напряжений, деформаций и параметров термического цикла.

Для предварительной проверки существующих критериев разрушения материала применительно к анализу образования холодных трещин было проведено сопоставление экспериментальных данных с параметрами НДС, рассчитанными в образцах для испытаний на замедленное разрушение четырехточечным изгибом по методу ЛТПЗ.

Известно, что траектория трещин при хрупком замедленном разрушении состоит из трех участков: хрупкого межзеренного очага зарождения, дорыва до свободной поверхности надпила и пластического развития трещины. В исследованиях выполненных материаловедами показано, что место инициации трещины находится в подповерхностном слое. В тоже время анализ результатов расчета показал, что из существующих критериев трещинообразования объемность напряженного состояния совпадает с расположе-

нием очага замедленного разрушения. Поэтому объемность напряженного состояния представляет интерес при анализе условий образования ХТ. ОНС определяется по отношению средних напряжений (σ_0) к интенсивности (σ_1) в данной точке: σ_0/σ_1 , где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения, МПа. ОНС является показателем изменения объема, т.е. характеризует склонность металла к раскрытию микро- и макротрещин.

На основании вышеизложенного для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи исследования:

1. Провести адаптацию метода численного моделирования к расчету напряжений в стыковых сварных соединениях.
2. Выполнить расчет и анализ параметров напряженно-деформированного состояния в сварном стыковом соединении. Установить параметры напряженно-деформированного состояния, определяющие образование "холодных" трещин в сварном соединении.
3. Экспериментально проверить результаты расчета напряженно-деформированного состояния в пробах и исследовать склонность легированных сталей (типа ЗОХГСА) к образованию "холодных" трещин.
4. Разработать методику использования параметров напряженно-деформированного состояния для оценки склонности легированных сталей к образованию "холодных" трещин при сварке.

Глава 2. Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния в сварочной технологической пробе

Во второй главе изложена методика, особенности проведения и основные результаты расчета.

В качестве исследуемого объекта была выбрана стандартная технологическая проба (ГОСТ 26388-84, тип VIII), известная в литературе как проба СЭЖ-19-ХТ (рис.1.). В качестве исследуемого материала была выбрана сталь ЗОХГСА, которая широко применяется в машиностроении при сварке ответственных конструкций из-за низкой стоимости и высоких прочностных свойств ($\sigma_B=1600$ МПа).

Для определения влияния геометрии СС на параметры НДС варьировались толщина (D) и ширина пластины до закрепления

(8а), а также высота шва (нш). В проведенных исследованиях рассматривалось стыковое соединение с толщиной свариваемых пластин 20 и 30 мм. Ширина сваренной пластины от оси шва до закрепления определялась условиями проведения эксперимента и составляла 50, 125 и 200 мм. Длина свариваемых элементов 100 мм.

Варьирование высоты шва (5, 7 и 9 мм) в проведенном исследовании осуществлялось изменением скорости сварки - 1,06, 0,6 и 0,4 мм/с, при постоянной мощности дуги ($I_{св} = 500$ А, $U = 2$ В). Эти высоты валиков наиболее часто используются при дуговой сварке под флюсом, особенно при сварке корневого шва.

Предполагалось, что изменение ширины пластины не оказывает существенного влияния на сварочный термический цикл (СТЦ), образование структуры и распределение диффузионного водорода, что позволяет при постоянной структуре металла и количестве диффузионного водорода варьировать уровень НДС.

Расчет НДС в образце пробы проводился МКЭ. При анализе распространения теплового потока в исследуемом теле и его геометрии и было установлено, что источники можно отнести к быстро движущимся. Учитывая также, что геометрия сварного соединения и закрепление свариваемых пластин не изменяется по длине, расчет напряжений проводился по плоской схеме.

Разбивка на квадратичные восьмиузловые элементы генерировалась таким образом, чтобы достичь наибольшего сгущения в зонах сварного шва и ЗТВ, т.е. в тех местах, где необходимо получить результаты расчетов с максимальной точностью (зона образования ХТ), а также там, где ожидалось наибольшее значение градиента температуры и, соответственно, параметров НДС.

Каждая точка соединения испытывает свой СТЦ, определяющий структуру и механические свойства материала. Однако в ОС можно дискретно выделить три зоны: сварной шов, ЗТВ и основной металл - с практически постоянными для металла данной зоны зависимостями механических свойств от температуры. Поэтому разбивка расчетной области на конечные элементы осуществлялась так, чтобы можно было фрагментарно выделить сварной шов и ЗТВ.

Для расчета НДС необходимо иметь температурные зависимости предела текучести, модуля упругости и свободной деформации. Наиболее важные точки этих зависимостей для зон сварного соединения были получены при анализе данных литературных источников, а также на основании предварительного расчета температуры

начала и конца распада аустенита и скорости охлаждения.

Расчет температурного поля в стыковом соединении осуществлялся по методике, которая основана на использовании аналитических уравнений и проводится в два этапа: 1) определение расположения точечного источника тепла, 2) непосредственно расчет температурного поля. Координаты источника тепла рассчитывались, исходя из условия, что в верхней и нижней точках линии сплавления максимальная температура равняется температуре литья (1450 °C).

Для анализа НДС рассчитывались главные напряжения и деформации, исходя из того, что они являются наиболее информативными параметрами НДС, а также объемность напряженного состояния.

Установлено, что для всех вариантов расчета образование и качественное распределение компонент напряжений и деформаций остаются подобными.

Как отмечалось в литературе, наибольшая возможность образования ХТ существует в ЗТВ у корня шва, поэтому в дальнейшем анализировались параметры НДС именно в этой зоне. Напряжения здесь, как и в целом для всего соединения за СЦ увеличиваются по известному механизму вследствие усадки и достигают максимума при полном остывании СС. Структурные преобразования оказывают существенное влияние на образования параметров НДС: деформации увеличиваются, а напряжения снижаются. После того как максимальная температура в СС станет меньше 400 °C (сразу после начала структурных преобразований) развитие пластических деформаций в этом диапазоне температур полностью прекращается. Остаточная величина интенсивности напряжений составляла немногим более 50% от предела текучести для всех вариантов расчета.

Проведенный анализ подтверждает, что для оценки возможности образования ХТ необходимо использовать компоненты главных напряжений, т.к. они, в отличие от значений компонент накопленной деформации, достигают максимума в интервале образования ХТ (от 200°C до полного охлаждения СС).

Для оценки условий образования ХТ анализировались остаточные НДС в образце технологической пробы. Из полученных результатов расчета следует, что главные напряжения и деформации достигают максимума в корне шва и в ЗТВ у нижней и верхней точках линии сплавления (ЛС). НДС достигает максимума в подповерхностном слое на расстоянии от свободной поверхности

0,2...1,1 мм и совпадает с существующими представлениями о расположении очага зарождения ХТ. При этом получено, что с увеличением высоты шва это расстояние также увеличивается, но остается практически постоянным для одной высоты шва.

По результатам расчета оценивались прежде всего компоненты НДС в поперечном сечении сваренной пластины (перпендикулярной берегам ХТ) наибольшие главные напряжения (НБГН) и деформации. Следует отметить, что направления наибольших главных напряжений от горизонтальной оси отрицателен и составляет $-60...-90^\circ$, то при ширине 200 мм он становится положительным $-65...85^\circ$, т.е. направление НБГН становится практически параллельным ЛС. Следовательно, можно предположить, что с увеличением толщины и ширины пластины при постоянной погонной энергии возможность образования "холодных" трещин уменьшается не только из-за снижения уровня напряжений, но и из-за изменения направления НБГН в месте наиболее вероятного образования ХТ. Отсюда следует вывод, что НДС может служить критерием, указывающим на место образования ХТ, а возможность образования трещины и направление их развития определяется величиной растягивающих напряжений нормальных к линии сплавления.

Для толщины пластины 20 мм и высоты шва 7 мм были дополнительно рассчитаны варианты с шириной пластины (B_s), равной 300 и 500 мм. Показано, что в целом качественное распределение параметров НДС по объему свариваемых пластин не изменяется, а уровень напряжений уменьшается.

Проведенный анализ влияния параметров НДС на трещинообразование позволяет предложить следующий критерий оценки влияния НДС на образование "холодных" трещин в сварном соединении:

- 1) очаг образования трещины находится в зоне с максимальной объемностью напряженного состояния;
- 2) образование и развитие трещины происходит под действием растягивающих напряжений, нормальных к линии сплавления.

Глава 3. Экспериментальное исследование влияние геометрических параметров стыкового соединения из стали 30ХТСа на образование "холодных" трещин

Для оценки достоверности полученных результатов расчета и определения сочетаний геометрических размеров и погонной энер-

гии, при которых в пробе исследуемой стали образуются ХТ, был проведен эксперимент на пробе СЭВ-19-ХТ (рис 1.).

Эксперимент проводился для образцов толщиной 20 и 30 мм, с шириной пластин до закрепления 50 и 125 мм при режимах сварки, обеспечивающих высоту шва 7 и 9 мм.

При проведении экспериментов для проверки точности проведенных расчетов определялись температура и перемещения точек, лежащих на поверхности пластины, а также проводились исследования сечения СС и измерения профиля трещины.

Определение температуры в нескольких точках на поверхности свариваемых пластин подтвердило корректность расчета температурных полей, рассчитанных для всех вариантов.

При проведении эксперимента регистрировались вертикальные и горизонтальные (ГП) перемещения точек, лежащих на поверхности пластин. Горизонтальные перемещения определялись для точек верхней поверхности пластины, лежащих на расстоянии 13 и 15 мм от оси шва для толщины пластины 20 и 30 мм, соответственно.

Данные об уровне и кинетике ГП являются наиболее важной информацией, поскольку позволяют оценить значения поперечных напряжений, ответственных за образование ХТ. Анализ кинетики горизонтальных перемещений позволяет сделать вывод, что с увеличением погонной энергии увеличиваются значения максимальных перемещений. При этом изменение ГП является немонотонным с двумя переходами через ноль (сначала наблюдается движение исследуемых точек к оси шва, затем от нее и через некоторое время снова к оси), что объясняется сложным механизмом деформирования пластины. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по ГП показывает, что расчет не дает первоначального движения точки к оси шва, т.к. при решении плоской задачи не учитывается влияние на рассматриваемое сечение остального объема СС. Далее их кинетика совпадает.

Для более полной картины деформирования пластин измерялись также вертикальные перемещения для нижней точки разделки кромок. Получено, что они практически всегда развиваются вниз.

Для всех регистрируемых величин было установлено, что с увеличением погонной энергии их максимальные значения также растут. Кинетика и уровень регистрируемых параметров качественно подобны и достаточно точно совпадают с расчетом.

После сварки и выдержки образцов в течение суток, корень

шва для определения факта образования ХТ травили 5% раствором азотной кислоты. После просушки образцы разрушались трехточечным изгибом так, чтобы происходило раскрытие возможной трещины в корне шва. Образование трещин зарегистрировано в образцах, с наибольшими значениями растягивающих напряжений (~ 1170 МПа) в зоне с максимальной ОНС в корневой части ЗТВ, имеющих толщину 20 мм, ширину пластины 50 мм и высоту шва 9 мм.

На нетравленных участках разрушения образцов в месте зарождения ХТ виден блестящий крупнозернистый излом, переходящий в матовый. Это обстоятельство свидетельствует о хрупком межзеренном зарождении трещины и дальнейшем вязком внутризеренном разрушением материала.

У образцов с выявленной трещиной снималась профилограмма разрушения. Как и для случая замедленного разрушения при "машинных" испытаниях в образце по траектории трещины можно выделить три участка различного типа разрушения: очаг зарождения трещины, дорыв до свободной поверхности разделки кромок и последующий вязкий рост трещины. Определить границы этих участков достаточно сложно ввиду невысокой точности контактного метода снятия профилограммы. В среднем первый участок составляет порядка 0,3...0,6 мм и расположен от поверхности зазора на глубине 0,4...1 мм.

Согласно расчетам, расположение максимальной ОНС практически совпадает с очагом зарождения трещины. Это подтверждает принятую гипотезу о возможности использования ОНС как критерия, указывающего на место образования ХТ.

Для оценки точности определения геометрии сварного шва и ЗТВ, заложенных в расчетную модель, проводился анализ макрошлифов, для чего образец разрезался в нескольких сечениях.

Таким образом, эксперимент позволил определить корректность проведенных расчетов.

Глава 4. Разработка и апробация методики оценки влияния напряженно-деформированного состояния на образование "холодных" трещин

В главе описана методика расчета и анализа НДС в сварном соединении и пример ее использования для случая наплавки греб-

ня колеса железнодорожного транспорта.

Целью использования этой методики является определение оптимальных размеров конструкции сварного соединения, параметров режима сварки и термообработки, уменьшающих возможность образования ХТ в изделии.

Методика требует проведения планированного расчета и эксперимента с последующей обработкой полученных результатов исследований и включает следующие этапы: 1) выбор объекта исследования; 2) выделение факторов, влияющих на процесс трещинообразования, варьирование которых допускает существующая либо разрабатываемая технология, и составление плана проведения эксперимента; 3) расчет сварочных напряжений/деформаций в исследуемом ОС; 4) проведение эксперимента; 5) сопоставление и анализ результатов вычислений и экспериментальных данных.

Под объектом исследования в предлагаемой методике следует понимать сварную конструкцию либо наплавляемое изделие, для которой заданы: 1) основной и присадочный металл; 2) конфигурация и геометрические размеры свариваемых элементов; 3) условия закрепления свариваемых элементов; 4) способ сварки и параметры режима сварки/наплавки.

Согласно требованиям, предъявляемым к сварному соединению, и возможностям производства, варьируемыми в исследовании факторами, оказывающими существенное влияние на образование ХТ, могут быть различные конструкционные и технологические факторы, которые могут варьироваться в исходном состоянии, а технологические – так же перед, во время и после сварки / наплавки. После выбора варьируемых факторов составляется план проведения эксперимента.

Предполагается, что для определения НДС в исследуемой конструкции должна быть решена термо-упруго-пластическая задача. После получения тензора остаточных напряжений рассчитывают величину и направление главных напряжений, а также объемность напряженного состояния.

При проведении эксперимента для определения достоверности получаемых результатов расчета необходимо получить максимум информации о перемещениях, деформациях и изменении температуры в сварном соединении в объеме достаточном для подтверждения достоверности результатов расчета.

Предлагаемая методика апробирована на примере анализа

двух вариантов наплавки гребня колеса железнодорожных вагонов (ГОСТ 10791-89, рис 3,а). Одной из наиболее часто встречающихся в эксплуатации причин преждевременного выхода из строя колес вагонов является износ гребней колес, заключающийся в утонении или подрезе гребней до уровня ниже допустимого (18 мм).

Пример использования предлагаемой методики основан на данных, полученных в МИИТе с помощью численного моделирования. Проводили расчет наплавки для колесной стали марки 2 ($C=0.55-0.65$; $Mn=0.5-0.9$; $Si=0.2-0.42$; $Cr=0.25$; $Ni=0.25$; $Cu=0.25$; $P=0.035$; $S=0.04$). Анализовались расчеты для вариантов с толщиной обода колеса 60 и 25мм при наплавке от поверхности катания к вершине гребня.

Анализируя главные напряжения по высоте ЗТВ, необходимо отметить, что у первого валика направление наибольших из них в радиальном сечении колеса перпендикулярно линии сплавления. В этих же точках наблюдаются наибольшие значения НВГН: 317МПа для колеса с ободом толщиной 60мм и 222 МПа при толщине 20 мм. Объемность также всегда максимальна у первого валика 1.22 и 1.63, соответственно. На рис.3,б показаны траектории трещин, образование которых возможно при данной технологии. Таким образом при большей толщине обода образование ХТ наиболее возможно.

С помощью программного комплекса "Свариваемость..." (MGTV), для первого варианта наплавки (толщина обода 60мм) были дополнительно рассчитаны концентрация диффузионного водорода и структура в ЗТВ каждого слоя наплавки. При этом начальное содержание водорода в металле наплавленного слоя задавалось равным $5\text{см}^3/100\text{г}$, типичным для АДЮФ при условии прокалки флюса. Получено, что максимальная концентрация водорода наблюдается в ЗТВ второго слоя и составляет $1.8\text{см}^3/100\text{г}$. Максимальный процент мартенсита в структуре ЗТВ получен у первого слоя и составляет около 90%, что объясняется высоким содержанием углерода и большими скоростями охлаждения в диапазоне 600...500°C. Максимальный диаметр зерна составляет порядка 70мкм. Расчетom получено, что для анализируемого варианта ХТ будут образовываться в ЗТВ у первого валика. Для снижения склонности стали к трещинообразованию исследовались различные варианты термической обработки. Установлено, что для обеспечения стойкости металла ЗТВ при наплавке образованию ХТ, температура предварительного подогрева должна быть не менее 120 °C.

а сопутствующего 80 °С. Возможен также вариант без подогрева с последующей выдержкой колеса в термостате непосредственно после сварки не менее 4,5 часов при максимальной скорости охлаждения не более 0.005 °С/сек. Важно отметить, что определенная расчетным путем, температура предварительного подогрева практически вдвое меньше, чем по существующей технологии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В существующих методиках анализа сопротивляемости металла образованию "холодных" трещин влияние напряженно-деформированного состояния на трещинообразование в полной мере не учитывается. Не установлены параметры напряженно-деформированного состояния, адекватно описывающие условия трещинообразования (место, направление и критерий разрушения). Для прогнозирования возможности возникновения "холодных" трещин необходимо разработать методику оценки влияния напряженно-деформированного состояния на трещинообразование.

2. Для расчета напряженно-деформированного состояния в сварном соединении в зависимости от режима сварки и геометрии сварного соединения использовался программный комплекс (МГТУ), созданный на базе метода конечных элементов. Для адаптации его к расчету напряженно-деформированного состояния в стыковом сварном соединении и анализа результатов расчета были разработаны алгоритмы и программы, позволяющие:

- рассчитать температурное поле в сварном соединении, а также геометрические размеры шва и ЗТВ, на основе оригинальной методики расчета положения источника тепла при использовании аналитических зависимостей;

- определить положение и величину главных напряжений и деформаций, а также объемность напряженного состояния;

- представить результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния для визуализации в системе АСАД (топография и направления главных напряжений и деформаций).

3. В результате экспериментальных исследований при сварке технологической пробы из стали ЗОХТ'СА установлено, что:

- погрешность, между определенными экспериментально и полученными в результате расчета горизонтальными и вертикальными перемещениями исследуемых точек на поверхности свариваемых

пластин, не превышает 28%, что подтверждает корректность проведенных расчетов;

- холодные трещины образуются в ЗТВ у корня шва при высоких значениях погонной энергии и малой ширине свободной части сваренных пластин ($B_s=50\text{ мм}$), очаг зарождения трещин наблюдается в $0,4...1\text{ мм}$ от свободной поверхности пластины и составляет $0,3...0,6\text{ мм}$.

4 Установлено, что ориентация наибольших главных напряжений в зоне с максимальной ОНС различна в пространстве, зависит от геометрических размеров СС и при ширине пластины 50 мм они практически всегда перпендикулярны линии сплавления ($\sim 70^\circ$), а при ширине 200 мм - параллельны ей ($\sim 70^\circ$).

5. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований установлено, что в металле легированной стали "холодные" трещины возникают:

- под действием напряжений первого рода;
- без макропластической деформации;
- в месте с максимальной объемностью напряженного состояния;
- под действием растягивающего напряжения в этом месте, нормального к линии сплавления, определяющего возможность возникновения и направление развития ХТ.

6. На базе проведенных расчетно-экспериментальных исследований разработана методика выбора рациональной технологии сварки и геометрии сварного соединения, обеспечивающих снижение опасности образования "холодных" трещин.

7. При использовании предложенной методики для анализа НДС при наплавке гребня колеса железнодорожного транспорта от поверхности катания к вершине гребня, получено, что наиболее вероятное образование "холодных" трещин в ЗТВ у первого наплавляемого валика. Определено, что для обеспечения стойкости металла трещинообразованию при наплавке необходим предварительный подогрев при температуре не ниже 120°C или сопутствующий - 80°C , либо выдержка в термостате не менее $4,5\text{ часа}$.

8. Результаты исследований положенные в разработанную инженерную методику оценки возможности образования "холодных" трещин, адаптированную для деталей и узлов подвижного состава переданы в Главное управление вагонного хозяйства МПС, ВНИИЖТ, на Стахановский вагоностроительный завод и ПО "Лугансктепловоз".

1. Куркин А.С., Петров П.Ю. Расчет НДС для однослойной стыковой автоматической дуговой сварки стали 30ХГСА // Производство и надежность сварных конструкций: Тезисы докладов научно-технической конференции стран СНГ. - Москва, 1993. - С.8.

2. Макаров Э.Л., Петров П.Ю. Исследование влияния НДС в сварном соединении технологической пробы на образование ХТ в зависимости от ее геометрических размеров // Производство и надежность сварных конструкций: Тезисы докладов научно-технической конференции стран СНГ. - Москва, 1993. - С.24.

3. Куркин А.С., Макаров Э.Л., Петров П.Ю. Использование параметров НДС в сварных соединениях для анализа склонности легированных сталей к образованию "холодных" трещин // Современные проблемы сварочной науки и техники: Тезисы докладов научно-технической конференции стран СНГ. - Ростов-на-Дону, 1993. - С.6.

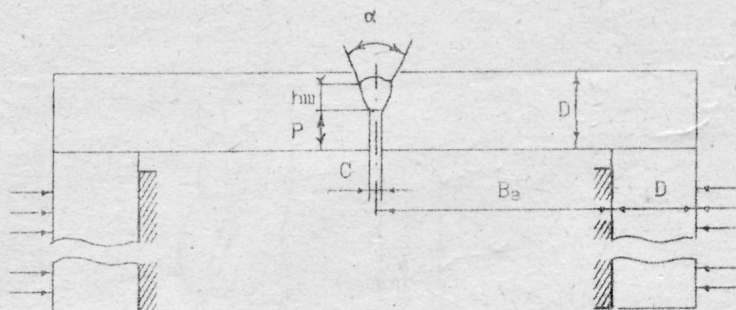


Рис.1. Поперечное сечение и схема закрепления образцов пробы:

D - толщина пластины, мм; B_z - ширина сваренной пластины от оси шва до закрепления, мм; P - притупление, мм; C - зазор между пластинами, мм; α - угол разделки кромок, град; $h_{ш}$ - высота сварного шва, мм

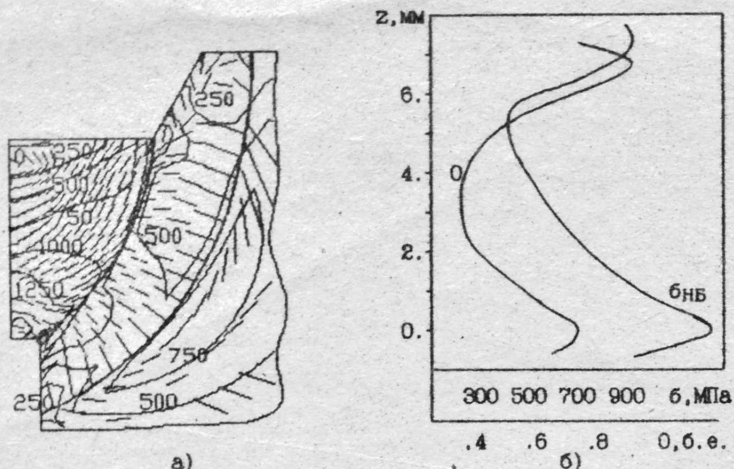


Рис.2. Фрагменты распределения наибольших в поперечной плоскости главных напряжений и их направлений (а; М 5:1), а также (б) эпюры остаточных параметров НДС: НВН (бНБ), объемности напряженного состояния (О)

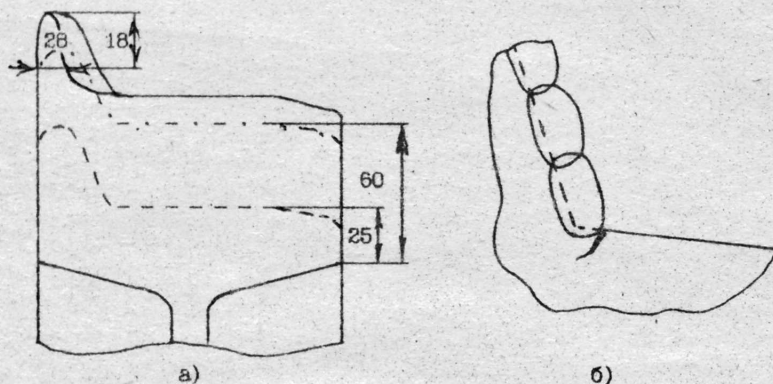


Рис.3. Сечение обода колеса железнодорожного транспорта (а) и возможное расположение ХТ в наплавленном колесе (б)