

На правах рукописи

УДК 621.791

**Труханов Константин Юрьевич**

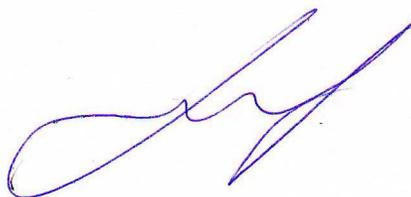
**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА  
ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ  
ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена кафедре технологий сварки Калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**ЦАРЬКОВ Андрей Васильевич**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.10)  
**ПОЛЕТАЕВ Юрий Вениаминович**  
ДГТУ, профессор кафедры машин  
и автоматизации сварочного производства

кандидат технических наук (05.02.10)  
**ТЕРЕНТЬЕВ Егор Валерьевич**  
НИУ «МЭИ», доцент кафедры технологий  
металлов

Ведущая организация: **РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М.Губкина, (Москва)**

Защита диссертации состоится «28» сентября 2017 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



**А.В. Коновалов**

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Горячие трещины (ГТ) являются характерным дефектом при сварке высоколегированных сталей, никелевых и алюминиевых сплавов. В настоящее время разработано большое число методик испытаний по оценке технологической прочности, носящих, как правило, качественный характер. Согласно ГОСТ 26389, основными критериями оценки являются величины критической скорости растяжения захватов испытательной машины и критический темп растяжения при «машинных» испытаниях в процессе сварки. При технологических пробах оценкой служит критическая скорость сварки. Температурный интервал хрупкости (ТИХ) является наиболее физически обоснованным количественным критерием оценки опасности возникновения ГТ. Экспериментальное определение ТИХ является трудоемкой процедурой и требует сложных экспериментальных исследований на специализированном уникальном оборудовании. Также величина ТИХ характеризует только свойства свариваемого материала шва или основного металла, но не характеризует деформационные процессы, которые также оказывают существенное влияние на процесс образования ГТ.

При исследовании технологической прочности необходимо учитывать ряд взаимодействующих факторов, таких как воздействие сварочного источника и вызванные им термомеханические процессы, реакцию изделия, вызванную жесткостью конструкции и его физико-химические свойства.

Развитие вычислительной техники дало возможность выполнять исследование термомеханических процессов в высокотемпературной области возникновения ГТ путем численного моделирования. Однако сложность математического описания процессов происходящих при взаимодействии дуги и расплавленного металла сварочной ванны приводит к необходимости совместного использования численных и экспериментальных методик.

**Цель работы:** разработка инженерной методики количественной оценки опасности возникновения горячих трещин с учетом реальных высокотемпературных термомеханических процессов, путем сочетания численного моделирования и экспериментальных измерений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести анализ существующих методик оценки количественных критериев сопротивляемости горячим трещинам при сварке плавлением.
2. Исследовать влияние реальной геометрии сварной ванны на термомеханические процессы и опасность возникновения горячих трещин при сварке тонколистовых конструкций.
3. Разработать и провести верификацию математического и программного обеспечения решения обратной задачи теплопроводности и анализа

термодеформационной задачи при сварке тонколистовых конструкций из высоколегированной стали.

4. Получить математические характеристики влияния основных технологических параметров на опасность возникновения горячих трещин.

5. Провести экспериментальную апробацию предложенной методики оценки опасности возникновения горячих трещин при сварке тонколистовых конструкций.

6. Разработать рекомендации по выбору параметров режима сварки корпуса автомобильного каталитического конвертера, обеспечивающих стойкость против образования горячих трещин.

#### **Научная новизна:**

1. В качестве количественного критерия оценки опасности возникновения горячих трещин при сварке тонколистовых металлических конструкций предложена величина максимальной кривизны контура хвостовой части сварочной ванны (МКВ).

2. Путем численного моделирования показан нелинейный характер изменения темпа деформаций в ТИХ при испытаниях на сопротивляемость образования горячих трещин. При испытании образца тип 1 (ГОСТ 26389), толщиной 2,5 мм, из стали 12Х15Г9НД темп деформации изменяется на интервале 100 градусов вниз от температуры солидус от  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/^\circ\text{C}$ .

3. Установлено наличие корреляционной связи между величинами максимальной кривизны хвостовой части сварочной ванны (МКВ) и стойкостью к образованию горячих трещин. Установлена экспоненциальная зависимость средней длины зафиксированных горячих трещин от МКВ.

4. Показано, что для каждого материала и толщины существует критическое значение максимальной кривизны хвостовой части сварочной ванны, при превышении которого стойкость против образования ГТ не обеспечивается. Установлено, что для стали 12Х15Г9НД, толщиной 2,0 и 2,5 мм, критическое значение МКВ составляет соответственно 1,44 и 1,40  $\text{мм}^{-1}$ , для стали 12Х18Н10Т, толщиной 1,0 мм - 1,20  $\text{мм}^{-1}$ .

5. Путем численного моделирования показана корреляция действующего темпа деформации и величины максимальной кривизны хвостовой части сварочной ванны. Расчетно-экспериментальным методом получены критические значения действующего темпа деформации. Для стали 12Х15Г9НД, толщиной 2,0 и 2,5 мм критическое значение действующего темпа деформации составляет соответственно  $16,5 \cdot 10^{-4}$  и  $14,6 \cdot 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$ , для стали 12Х18Н10Т, толщиной 1,0 мм –  $8,1 \cdot 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$

**Практическая ценность.** Разработана методика по определению критического значения МКВ. Получены математические модели связи параметров режима сварки, толщины, химического состава материала и численных показателей технологической прочности (МКВ и действующий темп деформации).

Разработанная методика оценки опасности возникновения горячих трещин использована при оптимизации режима сварки каталитического нейтрализатора выхлопной системы автомобиля Volkswagen Polo.

**Методы исследования.** Математическое моделирование высокотемпературных и термомеханических процессов. Программная реализация разработанных моделей и алгоритмов на языке Fortran 90, Delphi 7. Конечно-элементное моделирование в пакете SYSWELD. Обработка расчетных и экспериментальных данных с применением математических пакетов Matlab 7.0, Maple 10. Экспериментальное исследование технологической прочности при сварке тонколистовых конструкций из высоколегированных сталей 12X18H10T, 12X15Г9НД и 08X12Т1 толщиной до 3,0 мм. Запись термических циклов на АЦП LTR (ЗАО «Л-КАРД», г. Москва). Применялись установка автоматической сварки прямолинейных швов с управляемой скоростью и сварочный источник TransPuls Synergic 2700 TIG (Fronius). Контроль дефектов сварных швов осуществлялся на оптическом инвертированном микроскопе GX-51 (Olympus). Изготовление макрошлифов на шлифовальном станке Struers Laborol-25. Спектральный анализ осуществлялся на эмиссионном спектрометре АРГОН-5СФ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика численно-экспериментального определения максимального значения кривизны хвостовой части сварочной ванны.
2. Установленные в результате применения разработанной методики факторы, оказывающие существенное влияние на геометрию сварочной ванны.
3. Результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния различных технологических факторов на склонность к образованию горячих трещин в области хвостовой части сварочной ванны.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 2012, 2013, 2017), на научных семинарах кафедры технологий сварки Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана (Калуга, 2011, 2012, 2013), на Международной научно-технической конференции «Сварка и контроль-2013» (Пермь, 2013).

**Публикации.** Материалы диссертации отражены в 4 научных работах, из них 3 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в тезисах докладов на конференциях.

**Объем работы.** Диссертационная работа изложена на 156 страницах машинописного текста, иллюстрируется 127 рисунками, содержит 42 таблицы, состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (106 наименований).

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния методик оценки опасности возникновения горячих трещин.

Горячими трещинами (ГТ) при сварке называют хрупкие межкристаллитные разрушения металла шва и околошовной зоны, характерные для высоколегированных сталей, никелевых и алюминиевых сплавов.

Современное представление о ГТ основано на теории технологической прочности, разработанной в МГТУ Прохоровым Н.Н. Согласно данной теории, сопротивляемость сварного соединения образованию горячих трещин определяется температурным интервалом хрупкости и минимальной пластичностью в этом интервале и оценивается критическим значением темпа деформаций (Рис. 1).

Основными показателями запаса стойкости против образования ГТ являются критическая скорость и темп растяжения образца, критическая скорость сварки и величина ТИХ. В настоящее время наиболее часто для определения понятия ТИХ используется формулировка, данная в ИСО 17641. ТИХ определяется как разница между температурой нулевой прочности при нагреве и температурой восстановления пластичности до 5% на стадии охлаждения (Рис. 2).

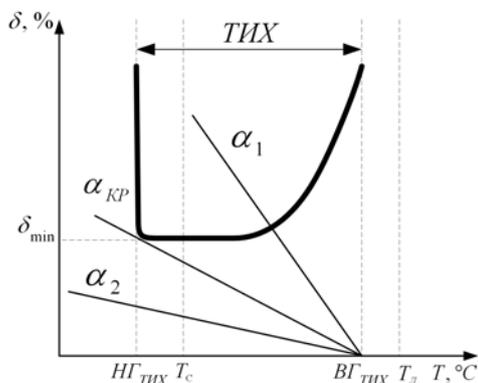


Рис. 1. Графическое пояснение теории технологической прочности Прохорва Н.Н.

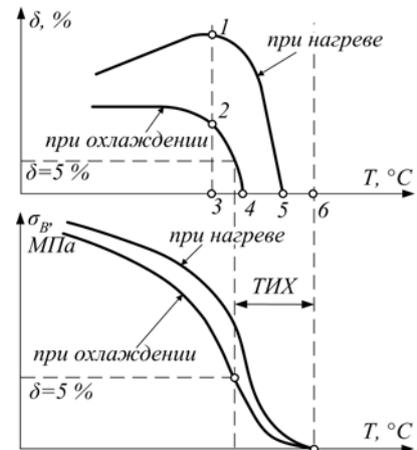


Рис. 2. Определение ТИХ (согласно ИСО 17641)

Для определения параметров технологической прочности разработано большое число экспериментальных методик (МВТУ-ЛТП, Transvarestraint, Varestraint, Gleeble и т.д.). Экспериментальные методики используют для сравнительной оценки запаса стойкости против образования ГТ различных материалов и режимов, но не позволяют оценить технологическую прочность реальных сварных конструкций и проводятся на сложном уникальном оборудовании. В основе численной оценки опасности образования трещин с помощью машинных методик лежит предположение о линейном характере деформаций в ТИХ.

В стандарт ИСО 17641, вышедшем в 2005 году, вошли испытания, прошедшие проверку при практическом использовании и отличающиеся простотой геометрии образцов и процедурой проведения. Однако разнообразие методик оценки и сложность применяемого оборудования приводит к тому, что результаты испытания по одной методике в различных лабораториях приводит к противоположным выводам об оценке технологической прочности.

Анализ работ отечественных (Прохоров Н.Н., Новиков И.И., Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. и др.) и зарубежных авторов (W.F. Savage, C.D. Lundin, V. Shankar, K. Wilken, C.E. Cross, M. Wolf и др.) показал, что при исследовании технологической прочности необходимо учитывать взаимодействие таких факторов как:

- параметры режима сварки, определяющие термический цикл;
- химический состав, определяющий интервал кристаллизации;
- и жесткость сварного соединения.

Развитие вычислительной техники дало возможность выполнять исследование сложных сварочных процессов путем численного моделирования. Путем сочетания экспериментальных результатов и компьютерного моделирования Королевым А.С. был разработан расчетный метод оценки запаса стойкости сварных алюминиевых конструкций против образования ГТ. Таким образом, сложность математического описания процессов, происходящих при взаимодействии дуги и расплавленного металла сварочной ванны, приводит к необходимости совместного использования численных и экспериментальных методик.

**Во второй главе** представлена разработка математического аппарата для исследования высокотемпературных процессов при сварке тонколистовых конструкций из высоколегированных сталей. Из-за сложности описания высокотемпературных сварочных процессов для построения адекватной численной модели предложено использовать схему испытания с простыми граничными условиями. За основу был выбран образец переменной ширины (тип 10а по ГОСТ 26389).

Для описания температурных полей используется дифференциальное нелинейное уравнение теплопроводности:

$$c(T)\rho(T)\partial T/\partial \tau = \text{div}(\lambda(T) \cdot \text{grad}T), \quad (1)$$

где  $\rho(T)$  - плотность;  $\lambda(T)$  - коэффициент теплопроводности;  $c(T)$  - удельная теплоемкость.

Движущийся сварочный источник тепла имитируется поверхностью солиду́с сварочной ванны  $T_s(x, y, z) = T_s$ , задаваемой в форме двойного эллипсоида с полуосями  $a_f, a_b, b, c$  (Рис. 3).

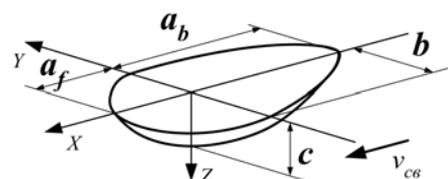


Рис. 3. Полуоси эллипсоида

Для решения уравнения (1) построена трехмерная конечно-разностная модель (Рис. 4).

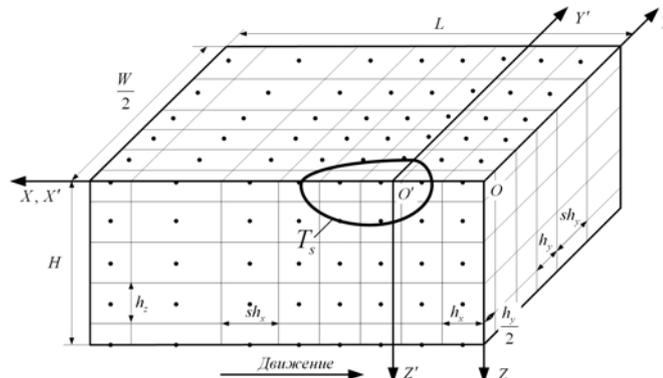


Рис. 4. Пространственная конечно-разностная сетка

Построенная численная модель была реализована на языке Fortran 90. Расчет температурных полей позволяет получить расчетные термические циклы для сравнения с экспериментальными замерами.

Эксперименты по верификации построенной модели проводились на стальных пластинах, толщиной 15 мм, проплавляемой неподвижной дугой на различных режимах (от 160 до 220 А) и интервалах времени горения дуги (от 0,5 сек до 6 секунд с шагом 0,5 секунды). Термический цикл измерялся с помощью термопары, закрепленной на расстоянии 8 мм от центра ванны. Данные об изменении геометрических размеров ванны, полученных по сканированной поверхности макрошлифов (Рис. 5,а) для различных моментов времени горения дуги, передавались в программу. Пример сравнения расчетных и экспериментальных термических циклов для времени горения дуги 3 секунды представлен на Рис. 5,б.

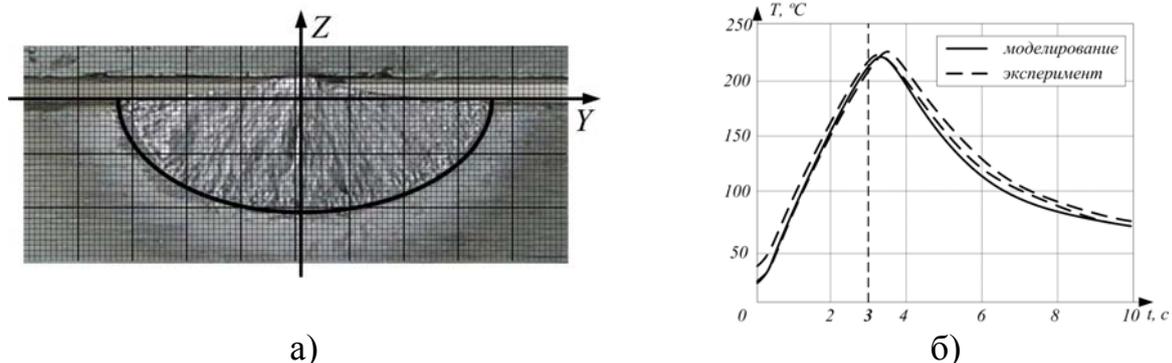


Рис. 5. Пример макрошлифа (а) и сравнения расчетных и реальных термических циклов (б) для неподвижной дуги

Эксперименты с подвижной сварочной ванной проводились на листовых пробах (Рис. 6) из стали 12Х15Г9НД, толщиной ( $\delta$ ) 2,0 и 2,5 мм и 12Х18Н10Т толщиной 1,0 мм. Химический состав сталей приведен в Таблице 1.

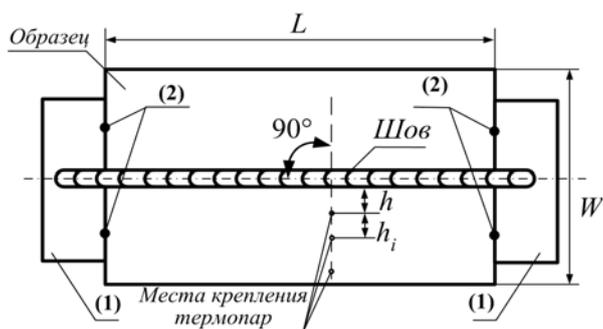


Рис. 6. Схема эксперимента:  
1 – технологическая планка; 2 – прихватка

Таблица 1.

Химический состав исследуемых сталей

Сталь	Содержание элементов, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Nb	V	B
12X15Г9НД	0,097	0,253	9,502	0,068	0,003	14,78	0,057	1,023	0,029	1,254	0,002	0,013	0,027	0,001
12X18Н10Т	0,132	0,43	0,8	0,036	0,017	18,96	0,16	10,09	0,057	0,229	0,62	0,003	0,038	0,0002

Режимы сварки (Таблица 2) подбирались таким образом, чтобы обеспечить полное проплавление пластин.

Таблица 2.

Параметры исследуемых режимов сварки

Марка стали	Толщина $\delta$ , мм	Режим	I, А	U, В	v, мм/с
12X15Г9НД	2,0	1.1	195	14,0	10,0
		1.2	140	12,5	7,5
		1.3	210	15,0	10,0
12X15Г9НД	2,5	2.1	210	15,3	8,5
		2.2	240	16,0	10,0
		2.3	260	16,0	12,5
		2.4	270	16,2	13,5
12X18Н10Т	1,0	3.1	80	10,6	6,8
		3.2	95	11,2	7,9
		3.3	125	12,1	10,5
12X18Н10Т	1,0	4.1	95	11,0	10,5
		4.2	95	11,0	12,5
		4.3	95	11,2	7,9

Ширина обратного валика использовалась для определения величины полуосей эллипсоида  $b$  и  $c$ . Идентификация величины хвостовой  $a_b$  и передней  $a_f$  частей сварочной ванны проводилась путем сравнения и минимизации методом наименьших квадратов разницы между расчетными и экспериментальными термическими циклами, примеры сравнения которых для режима 1.2 представлены на Рис. 7.

Для проведенных экспериментов были получены геометрические параметры сварочных ванн, контуры которых представлены на Рис. 8. Проведенные исследования показали адекватность построенной модели теплопереноса и возможность ее применения для идентификации геометрических параметров сварочной ванны.

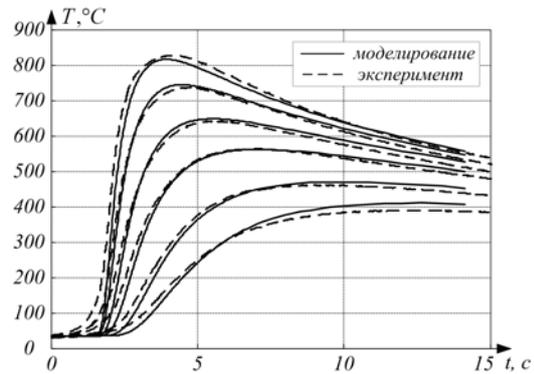


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных термических циклов

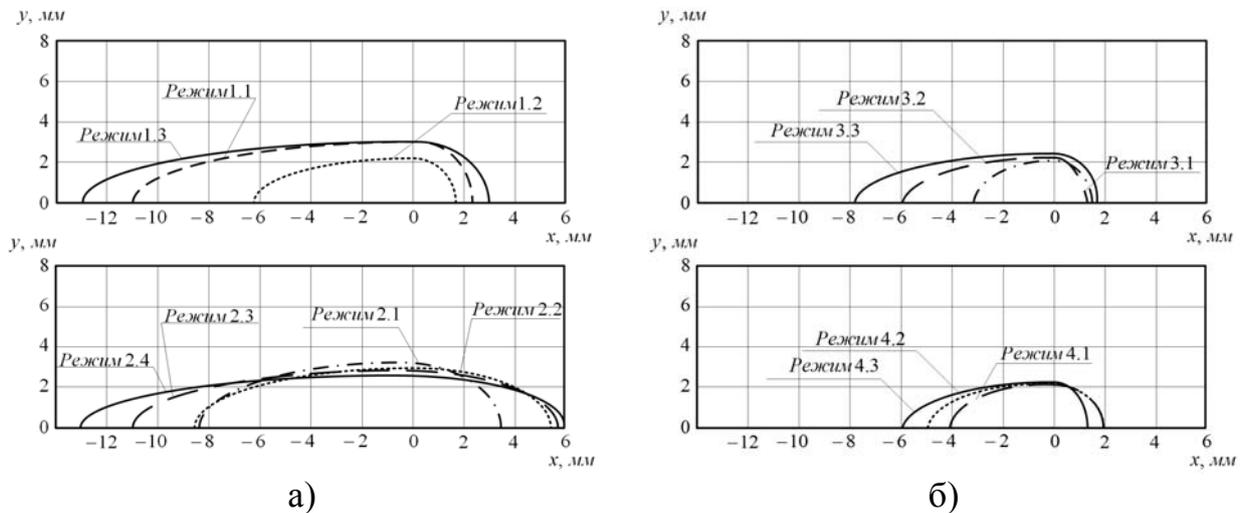


Рис. 8. Контурсы расчетных сварочных ванн: а – 12X15Г9НД; б – 12X18Н10Т

**В третьей главе** рассмотрен вопрос влияния формы сварочной ванны на склонность к образованию горячих трещин.

В качестве комплексной характеристики, учитывающей взаимодействие факторов образования ГТ, предлагается рассмотреть форму сварочной ванны. Ванна определяет распределение градиентов температур и характер кристаллизации (угол и поперечное сечение кристаллитов и т.д.). Согласно исследованиям, выполненным Прохоровым Н.Н., Новиковым И.И., Макаровым Э.Л., Якушиным Б.Ф., характер кристаллизации определяет распределение деформаций, минимальную пластичность и величину ТИХ.

Предлагаемая методика базируется на предположении о наличии тесной корреляционной связи между формой хвостовой части сварочной ванны и характером кристаллизации, а, следовательно, и опасностью возникновения кристаллизационных трещин. Достаточно большой фактический материал, подтверждающий наличие такой связи, приводится в работах М. Wolf.

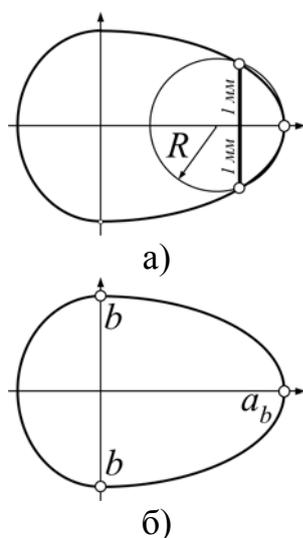


Рис. 9. Схема определения кривизны хвостовой части сварочной ванны

Славиным Г.А. в 1971 году рассматривался вопрос влияния формы сварочной ванны на стойкость против образования трещин при импульсной сварке. В качестве численной оценки формы ванны предлагалась величина радиуса окружности, построенной на базе 2 точек, находящихся на расстоянии 1 мм от оси шва и точки хвостовой части ванны, находящейся на оси шва (Рис. 9, а). Контур сварочной ванны определялся по границе кратера выплеснутой ванны или по чешуйкам на поверхности шва.

Однако данный подход весьма сложен в реализации на практике. Оценка формы ванны по точкам, находящимся на близком расстоянии друг к другу приводит к существенным ошибкам. Отклонение при определении положения точки на 0,1 мм приводит к ошибке оценки критерия до 20-30% и получению противоположного вывода о стойкости образования ГТ.

Согласно предлагаемой методике ванна аппроксимируется с помощью эллипсоида по точкам, определяемым полушириной ванны  $b$  и длиной хвостовой части  $a_b$  (Рис. 9, б). Погрешность аппроксимации, получаемую как площадь разности кривых ограничивающих контуры реальной ванны и эллипсоида (Рис. 10), не превышает 6%, что применимо для инженерных расчетов (Рис. 11).

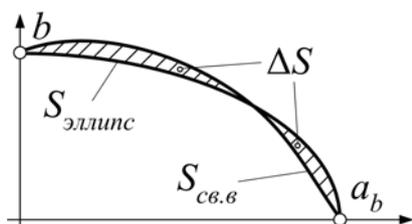


Рис. 10. Погрешность аппроксимации контура сварочной ванны

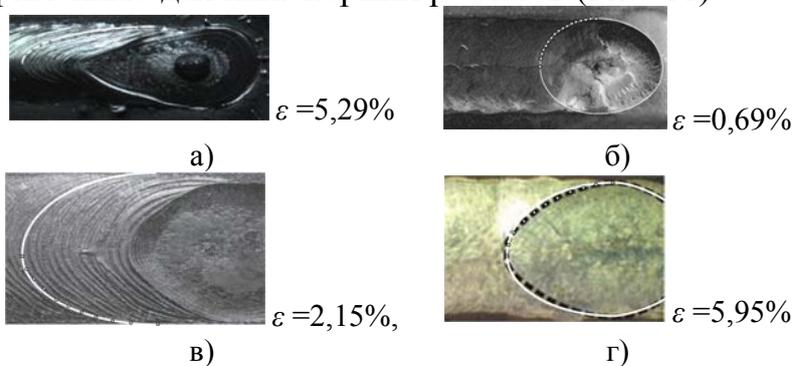


Рис. 11. Погрешность аппроксимации  $\varepsilon$

Исследования влияния ошибки при определении положения точек показали, что отклонение на 0,1 мм приводит к ошибке оценки критерия не более 2%.

Для дальнейшего исследования необходимо определить численный критерий, характеризующий форму сварочной ванны. Т.к. сварочная ванна аппроксимируется эллипсоидом, кривизна которого плавно увеличивается вдоль контура и достигает максимального значения на оси шва, в качестве

критерия предлагается принять максимальную кривизну линии контура хвостовой части сварочной ванны (МКВ) (Рис. 12).

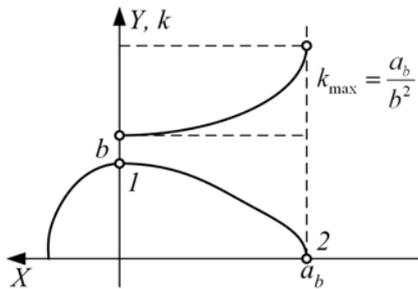


Рис. 12 Кривизна контура эллипсоида

Для определения МКВ предлагается следующая методика:

1. Сваривается 3-4 контрольных образца из испытываемого материала с обязательной записью термических циклов в ОШЗ и параметров сварочного режима. Путем визуально-измерительного контроля находятся полуоси эллипсоида  $b$  и  $c$ .

2. Путем численного решения обратной задачи теплопроводности выполняется подбор полуосей хвостовой и передней части ванны.

3. Путем последовательных приближений методом наименьших квадратов добивается идентичности термических циклов, измеренных экспериментально и полученных в результате численного моделирования.

4. Базируясь на полученных геометрических характеристиках сварочной ванны, определяется значение МКВ.

5. В зависимости от наличия (или отсутствия) кристаллизационных трещин изменяются сварочные параметры в сторону уменьшения (или увеличения) значения максимальной кривизны контура хвостовой части сварочной ванны.

6. Повторяется последовательность этапов 1-4 до момента определения порогового значения максимальной кривизны.

7. Полученное пороговое значение записывается в виде критерия трещиностойкости для данного материала и толщины.

С целью проверки выдвинутой гипотезы проводилась серия экспериментов по предлагаемой методике. Контроль наличия ГТ осуществлялся при 10-тикратном увеличении после снятия окалины с помощью ортофосфорной кислоты. Пример зафиксированных ГТ представлен на Рис. 13. Для каждого режима (Таблица 2) было проведено несколько экспериментов (от 4 до 10).



Рис. 13. Примеры обнаружены горячих трещин

Исследования показали, что увеличение МКВ приводит к росту опасности образования трещин (Рис. 14) и их длины (Рис. 16).

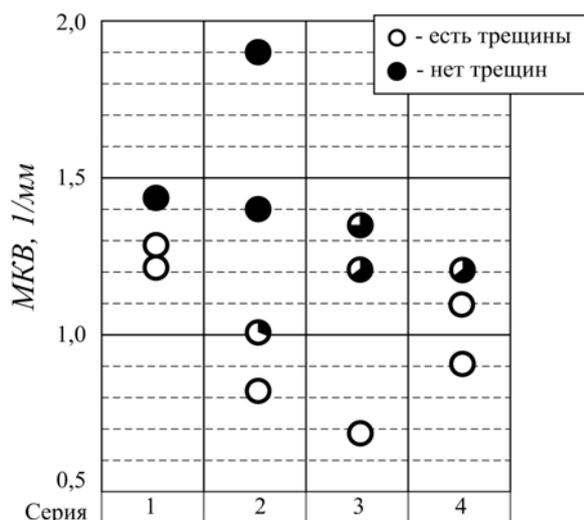


Рис. 15. Зависимость частоты образования ГТ от МКВ

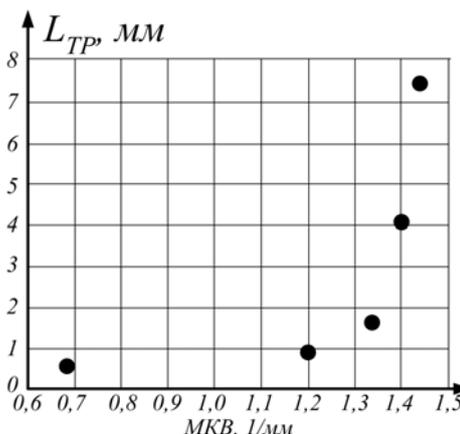


Рис. 16. Зависимость длины горячих трещин от МКВ

Приведенные выше результаты хорошо согласуются с предлагаемым количественным критерием. Для всех испытанных образцов стойкость против возникновения горячих трещин уменьшалась с ростом выбранного критерия – максимальной кривизны контура хвостовой части сварочной ванны.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния формы сварочной ванны на термодформационные процессы и технологическую прочность при сварке. Для изучения термодформационных процессов было использовано конечно-элементное моделирование процесса сварки в пакете SYSWELD.

Основными критериями оценки опасности возникновения ГТ, согласно ГОСТ 26389, являются критическая скорость растяжения захватов испытательной машины  $A$ , м/с и критический темп растяжения  $B$ , м/°С, вычисляемый по формуле

$$B = A/W_{\text{ТИХ}}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{ТИХ}}$  - средняя скорость охлаждения в интервале 100 °С, прилегающем снизу к температуре солидус, °С/с.

При моделировании процесса определения критического темпа растяжения рассматривалась машинная деформация  $\varepsilon_m$ , вызванная перемещением захватов, и собственная деформация  $\varepsilon_c$ , определяемая на базе 2 мм в зоне ТИХ (Рис. 17).

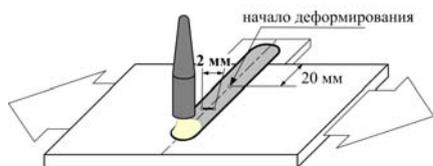


Рис. 17. Схема моделирования машинных испытаний

Результат моделирования показал нелинейность деформационных и температурных процессов вблизи ТИХ (Рис. 18), а, следовательно, некорректность применяемой оценки технологической прочности.

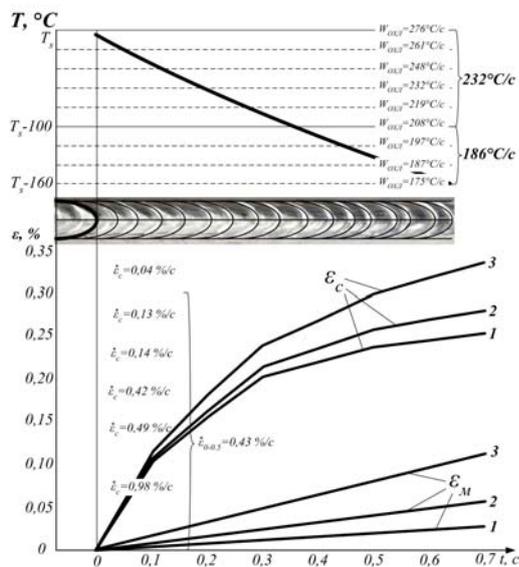


Рис. 18. Термический цикл и собственные деформации для скоростей растяжения, мм/с: 1 – 0,04; 2 – 0,08; 3 – 0,16

Расчеты выполнялись для момента времени, соответствующего прохождению электродом (центром эллипсоида) через точку, находящуюся на расстоянии ( $l_b$ ) 10 мм от передней кромки образца. Графическое пояснение к используемой схеме представлено на Рис. 19.

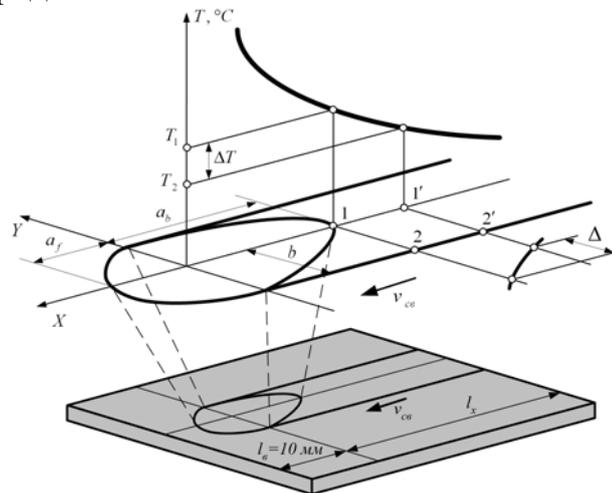


Рис. 19. Определение деформации металла шва при охлаждении

Действующий темп деформации определяется согласно выражению:

$$\alpha_d = \varepsilon_H / \Delta T + \alpha_T, \quad (4)$$

где  $\alpha_T$  - темп температурной деформации,  $\%/^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_T = \alpha \cdot 100\%$  ( $\alpha$  - коэффициент температурного расширения,  $1/^{\circ}\text{C}$ ).

Полученные значения наблюдаемой деформации и действующего темпа деформации представлены в Таблице 3. Из представленных данных видно, что рост кривизны хвостовой части сварочной ванны приводит к увеличению действующего темпа деформации. При превышении определенного критического значения темпа деформации в шве исчерпываются пластические свойства, что приводит к образованию ГТ. Критическое значение темпа деформации  $\alpha_{кр}$  для проведенных экспериментов оценивалось по режиму с минимальным значением действующего темпа деформации, при котором наблюдалось устойчивое возникновение ГТ.

Таблица 3.

Действующий темп деформации

Режим	Сталь	$\delta$ , мм	$\varepsilon_H$ , %	$\alpha_D$ , %/°C	$\delta_{min}$ , %	$\alpha_{кр}$ , %/°C
1.1	12X15Г9НД	2,0	-0,159	0,00118	0,112	0,00165
1.2			-0,145	0,00132		
1.3			-0,112	0,00165		
2.1	12X15Г9НД	2,5	-0,216	0,00061	0,131	0,00146
2.2			-0,187	0,00090		
2.3			-0,131	0,00146		
2.4			-0,072	0,00205		
3.1	12X18Н10Т	1,0	-0,221	0,00056	0,195	0,00081
3.2			-0,195	0,00081		
3.3			-0,189	0,00087		

Так как минимальная пластичность  $\delta_{min}$  характеризуется относительной поперечной деформацией металла шва в ТИХ, то ее значение определяется согласно (4) для режима, соответствующего  $\alpha_{кр}$ :

$$\delta_{min} = 2\Delta/B \cdot 100\% . \quad (5)$$

Рассчитанные значения  $\alpha_{кр}$  и  $\delta_{min}$  для проведенных серий экспериментов представлены в Таблице 3.

Для предложенного критерия МКВ и алгоритма его определения предлагается использовать пластину постоянной ширины. Для выбора размеров пластины с целью минимизации влияния граничных условий на жесткость образца и распределение температурных полей, при испытаниях было выполнено численное моделирование. В том числе было выполнено моделирование по предложенной схеме режимов 2.1-2.3 для различных значений ширины пластины  $W$  (Рис. 20).

Анализ проведенных исследований позволил численно подтвердить экспериментальные результаты и выбор схемы испытания и размеров образца.

**В пятой главе** рассмотрен пример применения разработанного метода оценки склонности сварных соединений к образованию горячих трещин при сварке тонколистовых стальных конструкций.

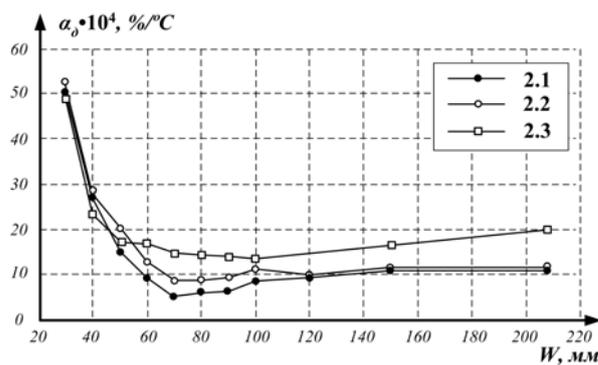


Рис. 20. Влияние ширины пластины на величину действующего темпа деформации для режимов 2.1-2.3

Результаты проведенных экспериментов по определению критических значений МКВ при сварке тонколистовых конструкций, использовались для построения математических моделей, позволяющих выполнять подбор режимов сварки и обеспечивающих отсутствие горячих трещин в исследованном диапазоне параметров.

Для учета смешанных оценок влияния параметров была выбрана модель второго порядка, описываемая полиномом:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1, i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (6)$$

где  $\{b_i\}$  - коэффициенты модели.

В соответствии с организацией выше описанных опытов, целью которых являлось изучение технологической прочности материалов, проведенная серия экспериментов является пассивной.

При построении первой модели факторами были выбраны основные технологические параметры режима сварки ( $I, U, v_{св}$ ), толщина ( $\delta$ ) и химический состав пластины (хром-никелевый эквивалент). Отклики: геометрические параметры сварочной ванны ( $a_b, b$ ), определяющие МКВ. Вторая модель связывает МКВ и толщину ( $\delta$ ) с действующим темпом деформации  $\alpha_0$ .

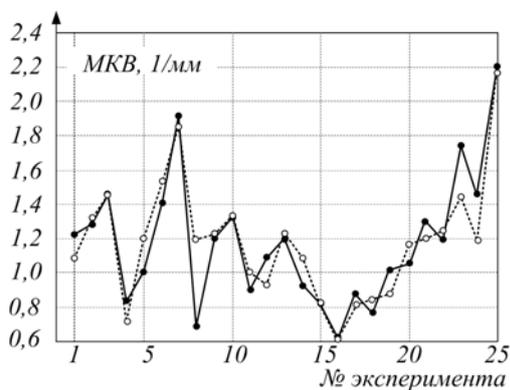


Рис. 21. Сравнение расчетных (пунктир) и экспериментальных (сплошная линия) значений откликов для модели МКВ

Для оценки значимости коэффициентов использовался критерий Стьюдента. На Рис. 21 приведен пример сравнения расчетных и экспериментальных значений откликов.

Полученные модели позволяют сделать вывод о стойкости против образования ГТ при сварке стальной пластины конкретной толщины, путем сравнения расчетного значения кривизны контура сварочной ванны и критического значения МКВ, полученного экспериментально.

Также разработанная методика была применена для оптимизации параметров режима сварки автомобильного каталитического конвертера (Рис. 22). Корпус конвертера изготавливается из листа нержавеющей стали марки EN 1.4512 (ГОСТ 08X12T1), толщиной 1,5 мм. Параметры базового режима 1 представлены в Таблице 4.

Таблица 4.

Оптимизация режима сварки каталитического конвертера

№	$I, A$	$v_{св}, см/мин$	$b, мм$	$a_b, мм$	$МКВ, 1/мм$	$\alpha_0 \cdot 10^4, \%/^{\circ}C$	Трещина
1	115	50	2,6	8,37	1,24	19,58	нет
2	180	80	2,6	11,32	1,68	30,70	есть
3	140	60	2,9	11,55	1,38	29,10	нет



Рис. 22. Изготовление корпуса каталитического конвертера

Соединение выполняется аргоно-дуговой сваркой неплавящимся электродом на установке, обеспечивающей программное управление скоростью сварки и силой тока. Для повышения качества соединения используется защита корня шва аргоном.

Для определения величины МКВ была проведена серия экспериментов. Пороговое значение критерия МКВ, после превышения которого образуются ГТ, составило  $1,68 \text{ мм}^{-1}$  (режим 2). Расчет темпа собственной деформации подтвердил полученные экспериментальные данные.

Исходя из полученных сведений, был предложен режим сварки (режим 3), параметры которого представлены в Таблице 4. Как следует из материала, применение методики позволило увеличить скорость сварки на 20%.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании анализа существующих теоретических и экспериментальных данных, а также результатов собственных исследований, установлена возможность использования в качестве количественного критерия оценки опасности возникновения горячих трещин при сварке тонколистовых металлических конструкций величины максимальной кривизны контура хвостовой части сварочной ванны (МКВ).

2. Разработанный численный алгоритм решения обратной задачи теплопроводности позволил получить адекватную математическую модель движущейся изотермической поверхности сварочной ванны, что подтверждено экспериментально.

3. Разработана методика по определению критического значения МКВ. Проведена экспериментальная апробация методики на примере испытания на сопротивляемость горячим трещинам тонколистовой высоколегированной стали марок 12X15Г9НД и 12X18Н10Т, различных толщин и подтверждена возможность ее применения для выбора технологии сварки.

4. Установлена связь режима сварки, критерия МКВ и опасности возникновения ГТ. Рост критерия МКВ приводит к снижению запаса стойкости против образования горячих трещин, при этом длина ГТ может служить в первом приближении оценкой величины интервала ТИХ.

5. Проведен анализ термдеформационного состояния в металле в высокотемпературной околошовной зоне. Расчетно-экспериментальным методом получены критические значения действующего темпа деформации для проведенных экспериментов. Установлено, что на режимах сварки, характеризующихся большим значением показателя МКВ, фиксируется превышение критического темпа деформации, приводящее к возникновению ГТ.

6. Установлен нелинейный характер изменения темпа деформаций в ТИХ при испытаниях на растяжение для оценки стойкости против образования горячих трещин.

7. Проведенные исследования показали возможность применения предлагаемого численного критерия (максимальной кривизны контура хвостовой части сварочной ванны) для оценки стойкости против образования горячих трещин и выбора технологии сварки тонколистовых конструкций из высоколегированных сталей, обеспечивающей необходимый запас технологической прочности.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Кривизна поверхности сварочной ванны как критерий опасности возникновения кристаллизационных трещин (Часть 1) // Сварка и диагностика. 2011. № 6. С. 20-25. (1,0 п.л./0,7 п.л.)

2. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Кривизна поверхности сварочной ванны как критерий опасности возникновения кристаллизационных трещин (Часть 2) // Сварка и диагностика. 2012. № 2. С. 13-15. (0,5 п.л./0,3 п.л.)

3. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Кривизна ванны как параметр оптимизации режима сварки // Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль-2013» (15-17 мая 2013 г.). Пермь, 2013. С. 371-382. (0,5 п.л./0,3 п.л.)

4. Труханов К.Ю., Царьков А.В. Исследование влияния формы сварочной ванны на опасность возникновения горячих трещин // Сварка и диагностика. 2014. №1. С. 27-31. (0,5 п.л./0,3 п.л.)