

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

**Алрухайми Анмар Гариб Атиях**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ  
ТРЕЩИН ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ДЛЯ  
ОДОБРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ**

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства».

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**ИВАНОВ Михаил Александрович**

**Официальные  
оппоненты:**

**ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич,**  
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск, заместитель генерального директора по науке и техническим проектам;

**КОРОБОВ Юрий Станиславович,**  
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией лазерной и плазменной обработки;

**ШАХМАТОВ Денис Михайлович,**  
кандидат технических наук, ООО «Центр подготовки специалистов «Сварка и Контроль», г. Челябинск, директор.

Защита состоится «01» июля 2022 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.5.06.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3599>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Фивейский Андрей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из главных проблем при сварке экономнолегированных сталей высокой прочности является их склонность к появлению холодных трещин (далее – ХТ), развитие которых происходит в течение длительного времени при номинальных напряжениях ниже предела текучести материала. Трещины в сварных конструкциях говорят о неспособности металла сварного соединения сопротивляться появлению и развитию трещины, что может привести к потере работоспособности конструкции.

В частности, опыт технического наблюдения за постройкой корпусов судов ледового класса из высокопрочной стали РСЕ500ТМ показал, что в ряде случаев в сварных угловых швах имеются множественные дефекты в виде холодных трещин, для исправления которых потребовался ремонт значительного количества блоков секций.

Следует отметить, что трещины возникли в сварных швах, выполненных по технологии сварки, аттестованной по Правилам Российского морского регистра судоходства (далее – РС), которые не были нарушены. Трещины в основном обнаруживались в жестко заземленных швах при сварке по замкнутому контуру равнопрочной основному металлу проволокой.

**Степень разработанности темы.** Проблема появления трещин в сварных конструкциях изучается многими исследователями (Макара А.М., Макаров Э.Л., Гончаров С.Н., Шапавалов В.И., Прохоров Н.Н., Романов Ю.Г., Шалимов М.П., Сараев Ю.Н., Голиков Н.И. и др.). По результатам проведенных исследований определены основные факторы возникновения ХТ, разработаны рекомендации, технологии и документы по борьбе с трещинами.

Вместе с тем опыт применения современных экономнолегированных высокопрочных сталей свидетельствует о том, что разработанные критерии и методы оценки сопротивляемости образованию ХТ требуют корректировки, т.к. не гарантируют их отсутствия в сварных соединениях.

Таким образом, представляется актуальным проведение исследований по обеспечению сопротивляемости образованию холодных трещин экономнолегированных высокопрочных судостроительных сталей для совершенствования методики одобрения технологических процессов сварки РС.

**Целью работы** является разработка методики оценки и способов регулирования сопротивления образованию холодных трещин сварных соединений судостроительных высокопрочных сталей при одобрении технологических процессов сварки.

### **Задачи исследования:**

- обоснование типа пробы и области её применения для оценки сопротивления образованию холодных трещин высокопрочных сталей;
- проведение экспериментального исследования сопротивления образованию холодных трещин сварных соединений высокопрочной стали РСЕ500ТМ с оценкой степени значимости погонной энергии, температуры начала сварки, группы прочности сварочных материалов;
- разработка методики и проведение расчётной оценки конструкционной прочности сварных соединений с «мягкими» угловыми швами для применения их в судокорпусных конструкциях;

- разработка предложений по совершенствованию методики одобрения технологических процессов сварки для ФАУ «Российский морской регистр судоходства».

#### **Научная новизна работы:**

1) экспериментально установлено, что для обеспечения сопротивления образованию холодных трещин сварку стали PCE500TM рекомендуется выполнять «мягкими» сварочными материалами категории Y42 без предварительного подогрева в диапазоне температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  и выше.

2) показано, что повышение сопротивляемости образованию холодных трещин сварных соединений с мягкими швами обусловлено образованием ферритно-бейнитной структуры с ферритом игольчатой морфологии не менее 40 % и снижением растягивающих остаточных сварочных напряжений на 100–120 МПа;

3) разработана методика оценки конструкционной прочности сварных соединений с «мягкими» угловыми швами из условия обеспечения статической прочности и усталостной долговечности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1) разработаны рекомендации по обеспечению сопротивляемости появления холодных трещин сварных соединений, позволяющие решать инженерные задачи по разработке технологии сварки экономнолегированных высокопрочных сталей;

2) разработаны рекомендации по оценке работоспособности тавровых сварных соединений с конструктивным непроваром, выполненных «мягкими» швами;

3) усовершенствована процедура одобрения технологических процессов сварки корпусных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали, при постройке и ремонте судов, в части оценки сварного соединения сопротивляться появлению холодных трещин на пробе «Тэккен» при сварке на минимальной погонной энергии;

4) результаты работы внедрены в нормативную документацию ФАУ «Российский морской регистр судоходства» в НД № 2-020101-118 «Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов» (циркулярное письмо № 314-01-1288ц от 18.11.2019) часть III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов».

#### **Методология и методы исследования**

В работе применялись следующие методы исследований: компьютерное моделирование сварочного термо-деформационного цикла в программном комплексе ESI SYSWELD; численное моделирование статической и циклической прочности в программном комплексе ANSYS для оценки хрупкого, вязкого, квазихрупкого и усталостного разрушения; металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе, дюрометрические – на твердомере ТВ-5214 А; экспериментальные исследования проводились на сварочном роботе FANUC ARC Mate 120iC, позволяющем выполнять сварные соединения с высокой степенью повторяемости режимов сварки.

#### **Степень достоверности результатов**

проведенных исследований подтверждена: применением современной научно-исследовательской техники и методов исследований; повторяемостью результатов экспериментальных исследований; использованием современных компьютерных программ численного моделирования, описывающих напряженно-деформированное

состояние в процессе нагрева и охлаждения сварного соединения. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

### **Личный вклад**

соискателя заключается в работе над целями диссертации, формулировании плана работы и постановке задач, организации работы над исследованием, разработке алгоритма поведения эксперимента, работе над пониманием и обработке результатов, полученных в эксперименте, а также в работе над составлением научных статей и их публикацией.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1) результаты компьютерного моделирования остаточных сварочных напряжений в зависимости от группы сварочных материалов и температуры предварительного подогрева;

2) результаты экспериментальных исследований сопротивления образованию холодных трещин с оценкой влияния температуры начала сварки, погонной энергии, группы прочности сварочных материалов;

3) результаты расчетной оценки конструкционной прочности сварных соединений с «мягкими» угловыми швами, полученные на основе их конечно-элементного моделирования;

4) требования к одобрению технологических процессов сварки судокорпусных конструкций, произведенных из стали высокой прочности.

### **Апробация работы**

В рамках работы над диссертацией, её промежуточные итоги были доложены научному сообществу на ряде конференций: на конференции, где выступают аспиранты и докторанты ЮУрГУ, г. Челябинск (2018, 2019); международной - практической конференции «Материаловедение и металлургические технологии» RusMetalcon, г. Челябинск (2018, 2020); международном симпозиуме ASTRU Meeting in Guangzhou, Китай (2018); международной конференции «Сварка в России» г. Томск (2019); L Всероссийский симпозиум «Механика и процессы управления» (2020), г. Миасс.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 7 научных статей, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 1 статья в научном журнале, входящем в базу Scopus.

### **Структура и объём работы**

По объёму диссертационная работа составляет 172 страниц, и включает в себя введение, 4 главы, выводы по работе, а также список использованных источников в количестве 112 штук, содержит 34 таблицы и 86 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности работы и проблемы, приведены факторы, влияющие на процесс образования трещин, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, а также представлены основные положения выносимые на защиту.

**В первой главе** выявлены факторы, влияющие на образование холодных трещин: неблагоприятные закалочные структуры, остаточный диффузионный водород и

растягивающие остаточные напряжения, на которые влияют химический состав стали и сварочной проволоки, погонная энергия сварки, температура подогрева и окружающей среды, механические свойства сварочного материала. Указанные факторы рассмотрены с позиции методов оценки сопротивляемости образованию холодных трещин, которые подразделяются на расчетные и экспериментальные методы.

Показано, что оценка технологической прочности экономнолегированных высокопрочных сталей нового поколения только расчетными методами с позиции анализа их химического состава недостаточна, потому что в этом варианте не учитываются особенности процесса сварки, в частности скорость охлаждения металла шва, которая существенно влияет на структуру и зарождение холодных трещин.

Экспериментальные методы нацелены на проверку технологии сварки при различных температурах начала сварки, погонных энергиях, конструктивных параметрах швов, жесткости напряженного состояния и требуют ранжирования.

Установлено, что содержание диффузионного водорода в большей мере сосредоточено в центре сварного шва, а скорость его выхода зависит от температуры начала сварки.

Анализ Правил Российского морского регистра судоходства показал, что имеющиеся критерии и методы оценки сопротивляемости высокопрочных сталей образованию холодных трещин не гарантируют их отсутствия в сварных соединениях судокорпусных конструкций, что требует корректировки порядка одобрения технологии сварки. На основании результатов первой главы сформулирована цель и поставлены задачи работы.

**Во второй главе** проведен анализ и оценка технологической прочности сварных соединений высокопрочных сталей. Для этого предложены критерии выбора технологической пробы, которые включают в себя оценку жесткости напряженно-деформированного состояния, возможности обеспечения зарождения трещины в зоне термического влияния и в металле шва, уровень известности и применимости пробы Российским и мировым профессиональным сообществом, а также оценку количества проб и трудоемкости испытаний. На основании предложенных критериев установлено, что проба «Тэккен» на сегодняшний день является наиболее подходящей для оценки появления холодных трещин высокопрочных сталей, а также она входит в российские и международные стандарты.

Исследования проводились на стали 10Г2ФБЮ, являющейся по НД № 2-020101-104 аналогом высокопрочной судостроительной стали РСЕ500ТМ (табл. 1). Сварные соединения выполнялись ручной дуговой сваркой и в среде защитных газов механизированным способом (табл.2).

Таблица 1 – Механические свойства стали по сертификатам качества

Сталь	Толщина металла, мм	Группа прочности стали	Предел прочности стали, МПа	Предел текучести стали, МПа	Относительное удлинение, %	Работа разрушения KCV
10Г2ФБЮ	18-36	К60	610-640	510-555	22-24,5	257-419 Дж/см <sup>2</sup> (-20 °С)
РСЕ500ТМ	Не более 50	500	590-770	Не менее 500	Не менее 19	Не менее 50 Дж (-40°С)

Таблица 2 – Механические свойства наплавленного металла

Марка сварочной проволоки	Группа прочности наплавленного металла	Предел прочности наплавленного металла, МПа	Предел текучести наплавленного металла, МПа	Относительное удлинение наплавленного металла, %	Работа разрушения KV, Дж
Электроды МТГ-01К	Y42	530	420	24	59 (-40 °С)
FILARC PZ6125	Y42	556	445	28,4	109 (-60 °С)
FILARC PZ6115	Y50	662	557	21	93 (-50 °С)
DW-A70L	Y62	724	668	23	88 (-50 °С)

На первом этапе исследовались сварные соединения, выполненные ручной дуговой сваркой (далее – РДС) электродами МТГ-01К с основным типом покрытия Ø3 мм на пробах «Тэккен».

Испытания проводились на 3 погонных энергиях, при комнатной температуре и при минус 20 градусах для двух толщин стенок – 18 и 36 мм. Режимы сварки и результаты проведенных исследований приведены в таблице 3.

Для анализа реакции металла на термический цикл сварки рассчитывали скорость его охлаждения ( $V_{8/5}$ ) в диапазоне температур 800–500 °С по формулам, рекомендованным EN 1011-2:2001:

$$V_{8/5} = \frac{300}{t_{8/5}}, \quad (1)$$

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \times Q \times \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3. \quad (2)$$

Здесь  $T_0$  – начальная температура сварки, °С;  $Q$  – эффективная погонная энергия с учетом КПД процесса нагрева изделия дугой, кДж/мм;  $F_3$  – коэффициент формы теплового потока, принятый равным 1.

Обнаружено, что трещины зарождаются в корне шва (рис. 1) и продвигаются в металле шва к верхней поверхности. Структура металла шва технологических проб «Тэккен» толщиной 18 и 36 мм при скорости охлаждения 108 °С/с представлена мартенсито-бейнитной смесью и выделениями видманштетт феррита по границам зерен (см. рис. 1б).

Таблица 3 – Результаты испытаний проб «Тэккен», выполненных РДС

Маркировка образца	Толщина металла, мм	Температура воздуха, °С	Эффективная погонная энергия, кДж/см	Скорость охлаждения $V_{8/5}$ , °С/с	Твердость, HV <sub>max</sub>		Наличие трещин
					МШ	ЗТВ	
3	18	+20	5,8	98	268	296	Есть
1			10,4	55	253	246	Нет
2			14,9	38	228	232	Нет
5		-20	5,8	108	301	289	Есть
4			10,4	60	274	268	Есть
6			14,9	42	231	252	Нет
5-1	36	+20	5,8	98	285	291	Есть
4-1			10,4	55	249	271	Нет
6-1			14,9	38	224	265	Нет
2-1		-20	5,8	108	306	329	Есть
1-1			10,4	60	231	252	Есть
3-1			14,9	42	236	247	Нет

Таким образом, из результатов эксперимента следует, что холодные трещины в испытуемом сварном шве не образуются при средней скорости его охлаждения, в интервале температур 800–500 °С, не более 55 °С/с. Они были обеспечены без предварительного подогрева свариваемых кромок за счет регулирования эффективной погонной энергии.

При сварке образцов при температуре 20 °С критической скорости охлаждения соответствует эффективная погонная энергия, равная 10,4 кДж/см, а при сварке образцов при температуре минус 20 °С – 14,9 кДж/см. Из этого следует, что сталь класса прочности РСЕ500ТМ толщиной до 36 мм может быть сварена без предварительного подогрева при условии, что назначенные режимы сварки обеспечивают среднюю скорость охлаждения в ЗТВ сварного соединения на уровне  $V_{8/5} \leq 55$  °С/с.

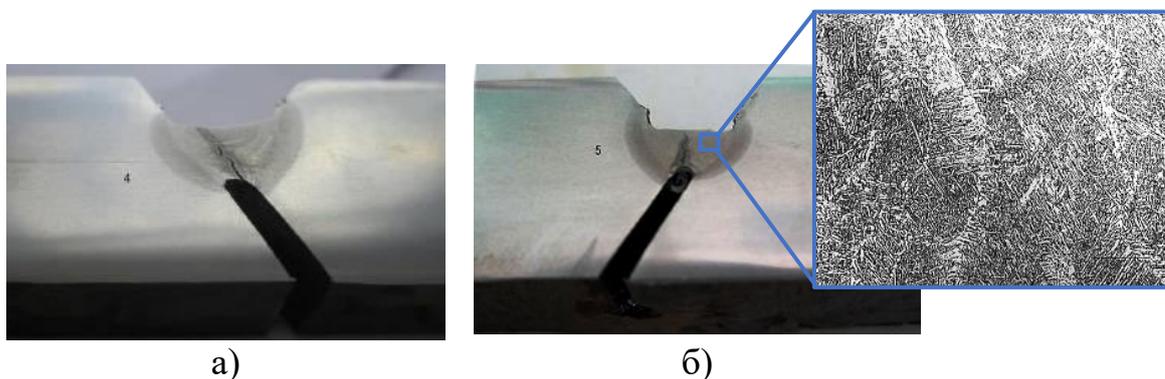


Рисунок 1 – Трещины, не вышедшие на наружную поверхность корневого валика в пробе «Тэккен»: а) образец № 4; б) образец № 5 с микроструктурой металла шва (x500)

Одним из критериев оценки склонности сварного соединения к появлению холодных трещин является его твердость. Согласно требованиям, твердость металла шва должна быть не выше 280, а ЗТВ – не более 325 HV<sub>10</sub> для сталей РСЕ500ТМ. В нашем случае критические значения твердости были достигнуты на образцах № 5, 2-1 (см. табл. 3), которые были заварены при температуре окружающего воздуха минус 20 °С с эффективной погонной энергией  $Q = 5,8$  кДж/см. В остальных образцах с трещинами твердость металла шва и ЗТВ соответствовали нормативным требованиям.

Таким образом, ограничение максимальной твердости, т.е. доли мартенсита в металле сварного соединения, является необходимым, но не достаточным условием для предотвращения образования ХТ.

Так как высокие механические свойства основного металла достигаются за счет термомеханического упрочнения с минимальным количеством легирующих компонентов (в то же время аналогичные механические свойства в наплавленном металле достигаются за счет легирования сварочных материалов), то необходимо проведение исследования влияния температуры начала сварки и прочностных характеристик проволок на технологическую прочность сварных соединений высокопрочной стали, с моделированием в заводских условиях сварки в среде защитных газов Ar (82 %) + CO<sub>2</sub> (18 %).

Были выбраны 3 марки проволоки  $\varnothing 1,2$  мм с различными механическими характеристиками (табл.2): равнопрочная проволока ESAB FILARC PZ6115, мягкая ESAB PZ 6125 и твердая фирмы KOBELCO DW-A70L.

Испытания проводились при температурах минус 20, 20 и 100 °С на пробах «Тэккен», изготовленных из стали PCE500TM толщиной 25,8 мм (табл 4).

Охлаждение проб до температуры минус 40 °С осуществлялось в морозильной камере с использованием твёрдого диоксида углерода. Готовые для сварки пробы поочередно устанавливались в позиционер сварочного робота FANUC ARC Mate 120iC, где пирометром проверялась температура начала сварки.

Таблица 4 – Результаты испытаний проб «Тэккен», выполненных сварочным роботом Fanuc ARC Mate 120iC в среде защитных газов

Маркировка образца	Предел текучести проволоки, МПа	Температура образца, °С	Эффективная погонная энергия, кДж/см	Скорость сварки, см/с	Скорость охлаждения, °С/с	Твердость, HV <sub>max</sub>		Наличие трещин
						МШ	ЗТВ	
1	445	20	15,2	0,43	37	324	338	Нет
2		103			29	330	290	Нет
3		-21			41	338	290	Нет
4	557	20			37	291	297	Нет
5		102			30	287	276	Нет
6		-19			41	309	298	Да
7	668	20			37	369	274	Да
8		100			30	298	284	Нет
9		-22			41	371	328	Да

В результате проведенных испытаний было установлено, что в сварных соединениях проб № 6, 7, 9 имеются поверхностные трещины протяженностью 26, 28 и 52 мм соответственно, что составляет 32, 35 и 65 % от общей длины испытуемого сварного шва (рис. 2 а), вычисленные по выражению (3). Среднее значение высоты корневой трещины по выражению (4), которое определяли по результатам измерений трех макрошлифов, отобранных от каждой из перечисленных выше проб (рис. 2 б), составило 59,6 %, 64,8 %, 95,7 % соответственно. Во всех остальных пробах (№ 1–5, № 8) не обнаружено поверхностных и корневых трещин.

$$C_f = \frac{\sum l_f}{L} 100, \quad (3)$$

$$C_s = \frac{H_c}{H} 100, \quad (4)$$

где  $L$  – длина испытуемого сварного шва, мм;  $\sum l_f$  – суммарная длина корневой трещины, мм;  $H$  – наименьшая толщина испытуемого сварного шва, мм;  $H_c$  – высота корневой трещины, мм.

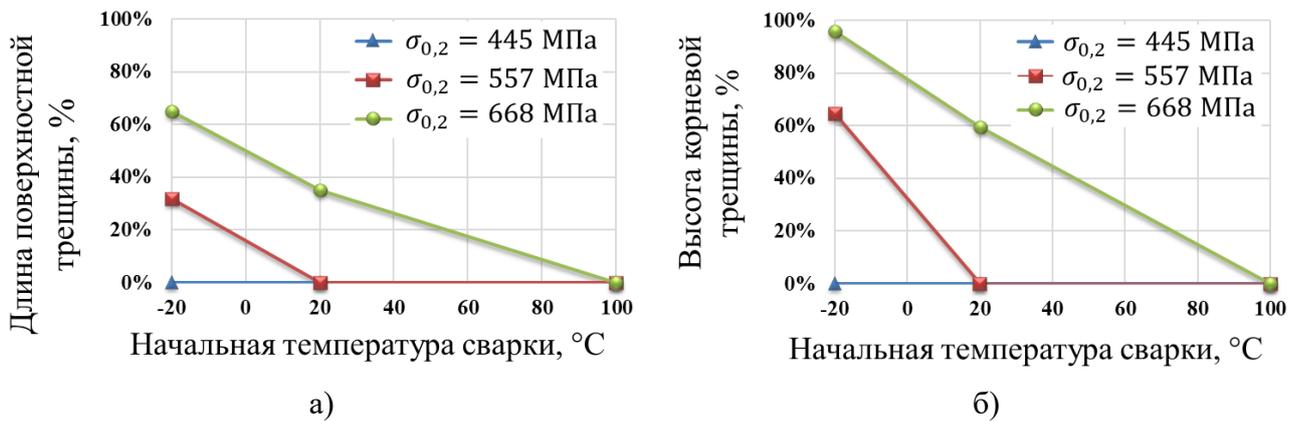


Рисунок 2 – Зависимость длины поверхностной трещины (а) и высоты корневой трещины (б) от температуры начала сварки и предела текучести сварочной проволоки

Для установления причин образования ХТ были проведены металлографические и дюрOMETрические исследования, из которых следует, что в металле шва исследуемых образцов наблюдаются крупные столбчатые зерна с бейнитной и бейнито-мартенситной структурой (рис. 3). По границам бывших аустенитных зерен в образцах № 1–6, № 8 наблюдается феррит различной морфологии: видманштеттов феррит и блочный феррит. В сварных швах образцов № 7 и 9 выделений феррита не обнаружено.

При последовательном анализе микроструктуры сварных швов, выполненных проволокой марки ESAB FILARC PZ6125, было установлено, что металл шва образца № 3, сваренный при температуре минус 20 °С, состоит из игольчатого феррита, бейнита и небольшого количества мартенсита. Максимальная твердость здесь наблюдается в металле шва и составляет 340 HV<sub>0,3</sub>.

Металл шва образцов № 1–2, сваренных этой же проволокой при температуре 20 и 100 °С, соответственно состоит из игольчатого феррита и бейнита с твердостью 320–330 HV<sub>0,3</sub>. Мартенситной фазы в данных образцах не наблюдается, поэтому применение предварительного подогрева до 100 °С не оказало значимого влияния на структуру и твердость испытуемых сварных швов (см. рис. 3).

В металле шва образцов № 7 и 9, выполненных проволокой марки KOBELCO DW-A70L, наблюдается большое количество малоуглеродистого мартенсита с отдельными участками игольчатого феррита и бейнита (см. рис. 3). Наличие мартенситной фазы подтверждается относительно высокой микротвердостью металла шва, которая составляет 370 HV<sub>0,3</sub>.

Для повышения сопротивляемости образованию ХТ сварку проволокой марки KOBELCO DW-A70L нужно проводить с обязательным предварительным подогревом кромок до ста градусов Цельсия, который приводит к снижению микротвердости и доли мартенситной составляющей в структуре металла шва (см. рис. 3).

Металл шва образцов № 4–6, выполненных проволокой марки ESAB FILARC PZ6115, состоит из игольчатого феррита и бейнита с твердостью 290–310 HV<sub>0,3</sub>. Причем большие значения микротвердости соответствуют образцу № 6, в котором была обнаружена поверхностная трещина.

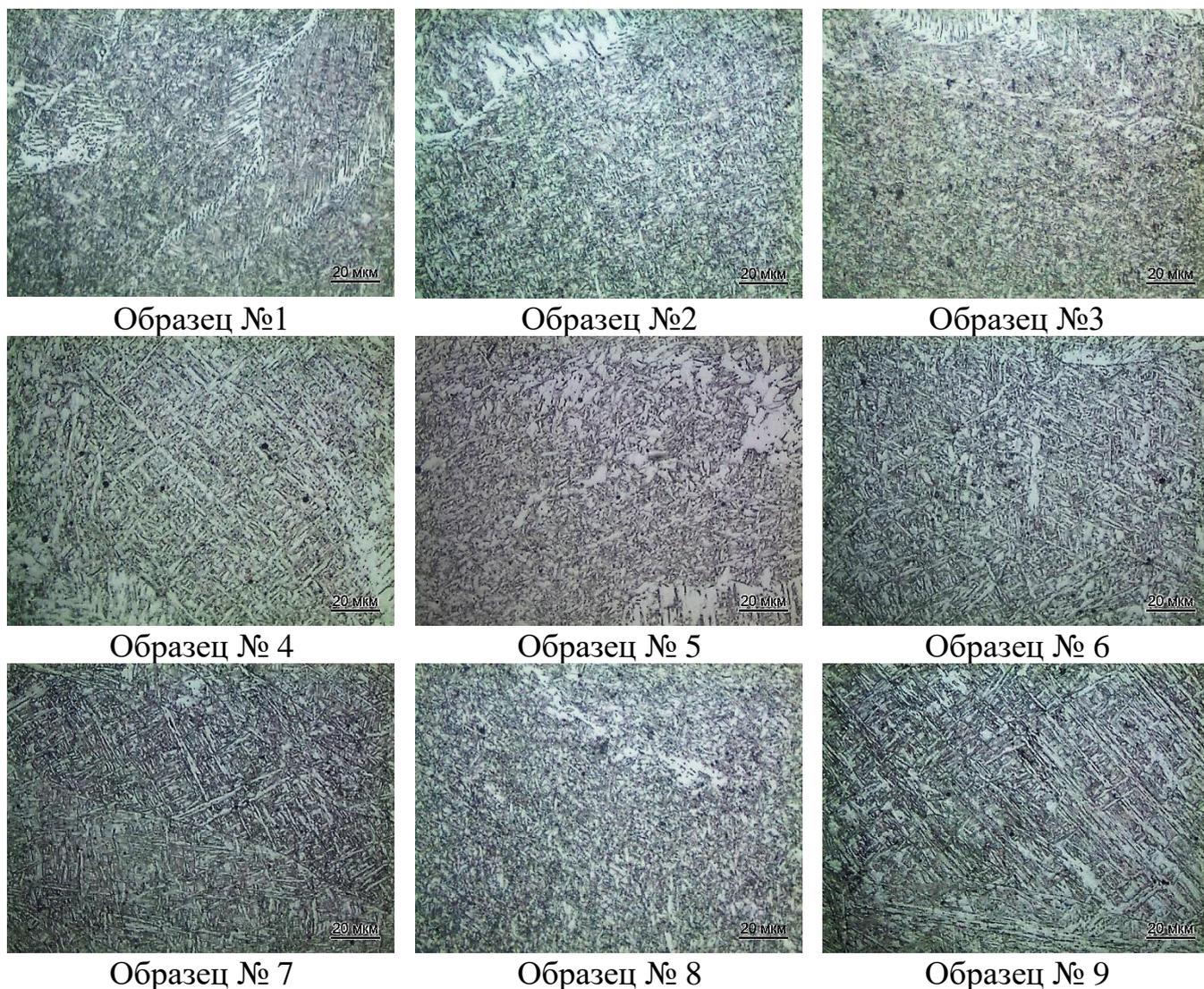


Рисунок 3 – Микроструктура металла шва проб «Тэккен», х400

Таким образом, при увеличении класса прочности сварочных материалов возрастает вероятность образования холодных трещин, особенно при сварке в условиях воздействия низких температур. Низкая сопротивляемость образованию холодных трещин порошковой проволоки Y62 при температуре начала сварки минус 20 °С обусловлена наличием в микроструктуре металла шва значительной доли малоуглеродистого мартенсита с твердостью до 370 HV<sub>0,3</sub> и высоким уровнем растягивающих остаточных сварочных напряжений в зонах конструктивных концентраторов напряжений в пробе «Тэккен».

Одновременно с этим, применение «мягкой» по отношению к основному металлу сварочной проволоки Y42 способствует образованию наиболее благоприятной ферритно-бейнитной структуры с ферритом игольчатой морфологии, обладающей высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин.

Моделирование процесса сварки проб «Тэккен», выполненных разными сварочными проволоками с целью оценки их влияния на величину и характер распределения остаточных сварочных напряжений (ОС), проводилось с помощью программного комплекса ESI SYSWELD, который позволяет учитывать температурные деформации, фазовые превращения и деформационное упрочнение металла сварного соединения при формировании ОС.

При создании сетки модели применялись объемные конечные элементы с меньшими размерами в области металла шва. Количество конечных 3D-элементов в модели составляет 60 060 шт., количество узлов – 64 081 шт. Шаг сетки в области шва 0,2 мм. Задача решалась в геометрически и физически нелинейной постановке с использованием билинейной модели с изотропным упрочнением.

Для валидации конечно-элементной модели пробы первоначально была решена тепловая задача, результаты которой сравнивали с результатами натуральных испытаний проб «Тэккен». Сравнение проводилось по форме и протяженности ЗТВ сварных швов, результаты которого свидетельствуют об удовлетворительной корреляции результатов расчета и эксперимента (рис. 4 а, табл. 5).

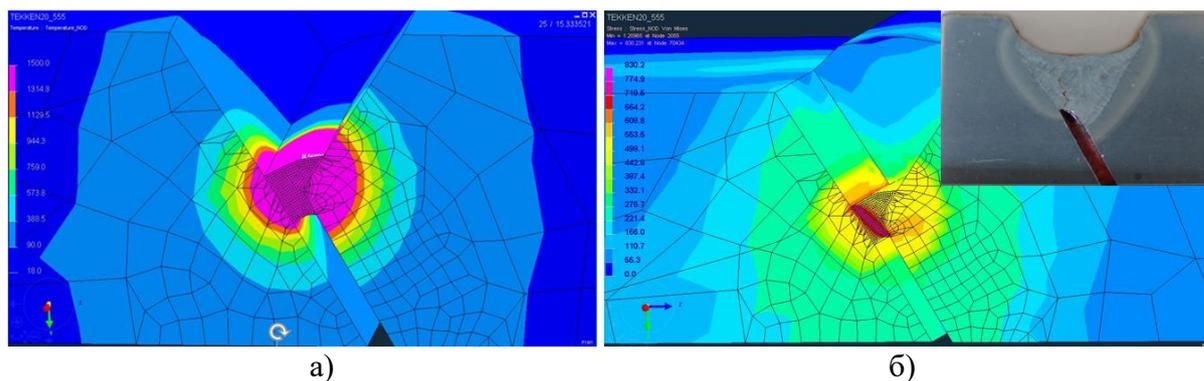


Рисунок 4 – Компьютерное моделирование температурного поля (а) и поля остаточных напряжений по Мизесу (б) пробы «Тэккен»

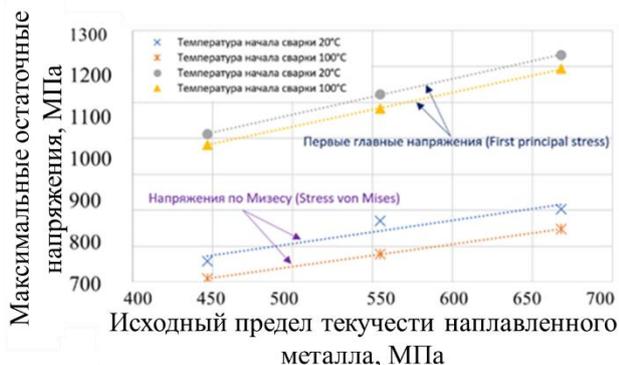
Таблица 5 – Протяженность зоны термического влияния проб «Тэккен», мм

Вид испытаний	Номер пробы								
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Эксперимент	2,6	3,1	2,6	2,8	3,5	2,6	2,7	3,0	2,8
Моделирование	2,7	3,0	–	2,7	3,0	–	2,7	3,0	–

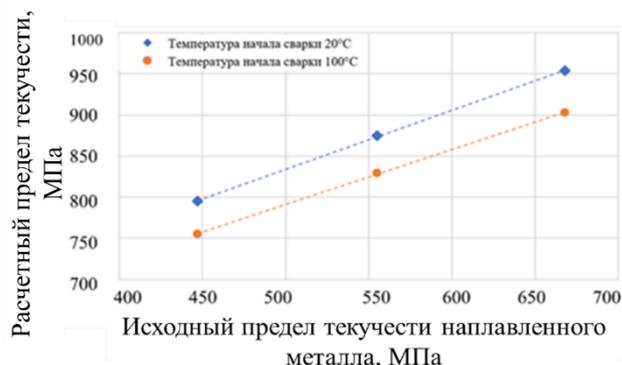
Из результатов численного моделирования следует, что максимальные остаточные напряжения формируются в зонах конструктивных концентраторов – в корне шва и на наружной поверхности валика в зоне перехода от шва к основному металлу (рис. 4 б). Величина остаточных напряжений здесь в 1,5–2 раза больше величины остаточных напряжений, которая сформировалась в основной части сварного шва.

Из этого следует, что данные участки будут являться потенциальными местами зарождения ХТ.

Превышение величины ОС значений предела текучести наплавленного металла, которые приведены в сертификатах на сварочные материалы (см. табл. 2), обусловлено существенным деформационным упрочнением металла шва в пробе «Тэккен» (рис. 5 б), которая обладает значительной жёсткостью и концентрацией напряжений в корне шва.



а)



б)

Рисунок 5 – Графики зависимости максимальных остаточных сварочных напряжений (а) и расчётных значений предела текучести металла шва (б) от исходного предела текучести наплавленного металла

По полученным результатам построены уравнения регрессии

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0,9953 \cdot \sigma_{0,2} + 668 \text{ при } T_{CB}^H = 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (5); } & \sigma_1 &= 0,9549 \cdot \sigma_{0,2} + 654 \text{ при } T_{CB}^H = 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (6);} \\ \sigma_{Mises} &= 0,6533 \cdot \sigma_{0,2} + 480 \text{ при } T_{CB}^H = 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (7); } & \sigma_{Mises} &= 0,6244 \cdot \sigma_{0,2} + 431 \text{ при } T_{CB}^H = 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (8);} \\ \sigma_{0,2}^{Pacч} &= 0,7193 \cdot \sigma_{0,2} + 474 \text{ при } T_{CB}^H = 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (9); } & \sigma_{0,2}^{Pacч} &= 0,7193 \cdot \sigma_{0,2} + 474 \text{ при } T_{CB}^H = 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (10).} \end{aligned}$$

Здесь  $\sigma_{0,2}^{Pacч}$  – расчетный предел текучести сварного шва, МПа;  $\sigma_{0,2}$  – исходный предел текучести наплавленного металла, МПа;  $\sigma_1$  – первые главные напряжения (максимальные растягивающие), МПа;  $\sigma_{Mises}$  – напряжения по Мизесу, МПа;  $T_{CB}^H$  – температура начала сварки, °C.

Степень рассеяния расчетных и экспериментальных данных оценивалась коэффициентом корреляции, величина которого для уравнений (5)–(6), (8)–(10) составляет не менее 0,99, а для уравнения (7) – 0,9.

Таким образом, величина максимальных растягивающих остаточных сварочных напряжений линейно зависит от предела текучести наплавленного металла и температуры начала сварки. Снижение класса прочности сварочных материалов на 100 МПа позволило уменьшить величину максимальных растягивающих остаточных сварочных напряжений на 100–120 МПа, а применение предварительного подогрева до 100 °C – на 26–41 МПа.

**В третьей главе** приведена методика расчетной оценки конструкционной прочности таврового сварного соединений с непроваром, которая позволяет провести ранжирование ряда альтернатив его исполнения исходя из условия сопротивления вязкому, хрупкому и усталостному разрушению. Методика применяется на стадии поверочных расчетов – после выбора типа и размеров сварного соединения, свойств основного и наплавленного металла (рис. 6).

Анализ возможности вязкого разрушения выполняется путем численного расчета предельной нагрузки и сравнения её с допустимой величиной. Расчет выполняется в физически и геометрически нелинейной постановке в ПК ANSYS. При расчете применяется истинная диаграмма деформирования материала, которая определяется экспериментально или восстанавливается по стандартным механическим характеристикам.

Анализ сопротивления хрупкому разрушению проводится с позиций механики разрушения путем расчета коэффициента интенсивности напряжений (КИН) около

вершины трещины  $K_I$  и сравнения его с допускаемым значением  $K_{Ic}$ . Расчет  $K_I$  проводится в программном комплексе ANSYS, который реализует метод конечных элементов и умеет учитывать сингулярность напряжений при их моделировании в устье трещины в упругом состоянии.



Рисунок 6 – Алгоритм расчетной оценки конструкционной прочности сварного соединения

Анализ работоспособности при циклическом нагружении выполняется путем расчета числа циклов нагружения, за которое длина трещины  $l$  увеличивается от начального значения до критического, вызывающего лавинный рост трещины и разрушение соединения в одном цикле нагружения.

Расчет производится следующим образом:

1. Определяется зависимость  $K_I(l)$  путем выполнения серии упругих расчетов; для различных значений  $l$  рассматривается не менее 4 значений  $l$  в диапазоне от 0 до длины, равной  $1.34a$  (где  $a$  – катет сварного шва).

2. Для найденных значений  $K_I(l)$  вычисляется скорость роста трещины, затем – путем интегрирования этой зависимости – зависимость длины трещины от числа циклов.

Анализ возможности квазихрупкого разрушения выполняется путем расчета энергетической характеристики (скорости выделения энергии при росте трещины) и сравнения ее с критическим значением. Расчет выделения энергии выполняется методом конечных элементов путем последовательного рассмотрения двух состояний: начального (с трещиной заданной длины  $l$ ) и последующего (с трещиной длиной  $l + \Delta l$ ).

Для иллюстрации возможностей разработанной методики выполнен сравнительный анализ прочности и долговечности 2-х вариантов исполнения таврового сварного соединения: с катетом 14 мм для равнопрочного шва и 15,4 мм – для «мягкого» сварного шва (рис. 7) с трещиной  $l$ .

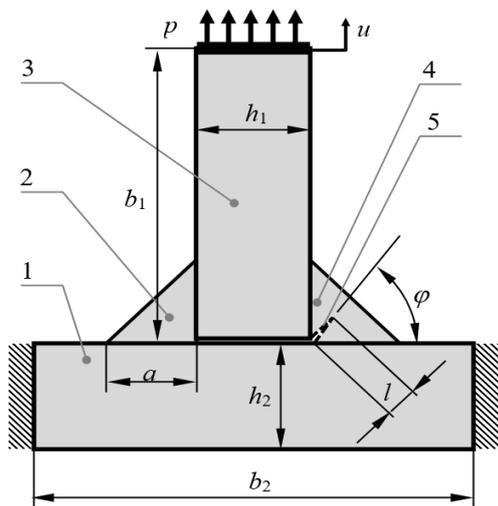


Рисунок 7 – Расчетная схема сварного соединения:

1, 3 – соединяемые детали; 2,4 – сварные швы; 5 – трещина;

$l, \varphi$  – размер и положение трещины;  
 $p$  – нагрузка,  $u$  – перемещение.

Вариант 1:  $h_1 = h_2 = 40$  мм,  $a_1 = 14$  мм, характеристики материала шва: предел текучести  $\sigma_{0,2} = 557$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 662$  МПа, удлинение при разрыве  $\delta = 21$  %, ударная вязкость при температуре минус  $50^\circ\text{C}$  KV = 93 Дж;

Вариант 2:  $h_1 = h_2 = 40$  мм,  $a_2 = 15,4$  мм, характеристики материала шва: предел текучести  $\sigma_{0,2} = 445$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 556$  МПа, удлинение при разрыве  $\delta = 28,4$  %, ударная вязкость при температуре минус  $40^\circ\text{C}$  – 139 Дж, при температуре минус  $60^\circ\text{C}$  – 109 Дж.

Выполненные расчеты показали (рис. 8 – 11), что:

- запас по хрупкому разрушению при температуре эксплуатации минус  $50^\circ\text{C}$  для варианта 2 на 11...23 % больше, чем для варианта 1;
- максимальная нагрузка на соединение для варианта 2 составляет 94 % от таковой для варианта 1; нагрузки практически сравниваются при увеличении катета шва в варианте 2 до 16 мм;
- выигрыш в долговечности варианта 2 по сравнению с вариантом 1 составляет до 40 %.

Таким образом, применение «мягких» сварных швов для тавровых соединений высокопрочных сталей, склонных к холодным трещинам, позволяет решать задачи по обеспечению их технологической и конструкционной прочности.

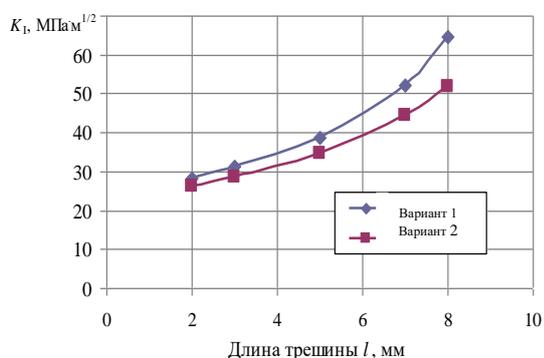


Рисунок 8 – Зависимость КИН от длины трещины

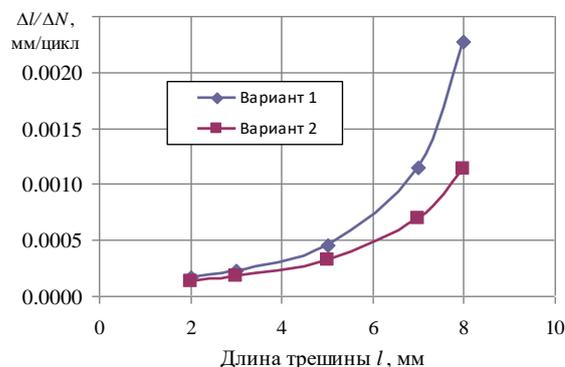


Рисунок 9 – Скорость роста усталостной трещины от её длины

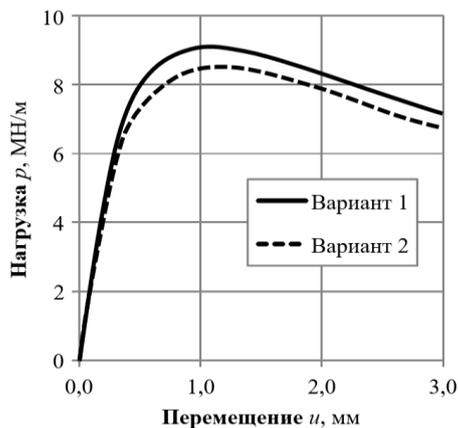


Рисунок 10 – Зависимость «нагрузка–перемещение» при вязком разрушении

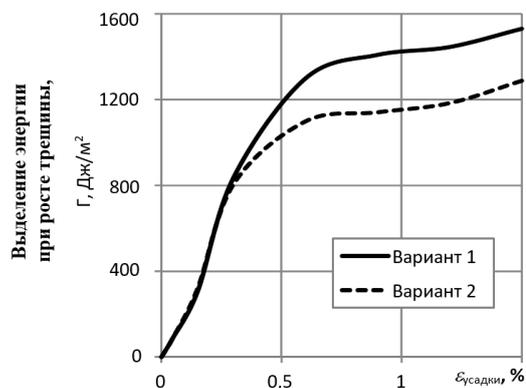


Рисунок 11 – Выделение энергии при подрастании трещины при квазихрупком разрушении

В четвертой главе разработана и апробирована методика одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей с оценкой сварного соединения сопротивляться появлению холодных трещин, которая базируется на стандартном испытании, но имеет ряд дополнений и корректировок (рис. 12). В частности, для внедрения в морской регистр предложено ограничить область одобрения погонной энергией, при которой проводились испытания, без права её снижения. Также было увеличено число проб для ручной дуговой сварки для исключения «человеческого» фактора.



Рисунок 12 – Схема проведения одобрения технологии сварки высокопрочных сталей

Наряду с методикой одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей для предотвращения появления холодных трещин предлагается применять «мягкие» (по пределу текучести) сварочные материалы на 2 категории

ниже основного металла. При этом для расчетных сварных швов требуется проверка конструкционной прочности по методике, изложенной в главе 3, а для нерасчетных – рекомендуется применять без ограничений.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. На основании предложенных критериев показана целесообразность применения пробы «Тэккен» для оценки влияния технологического процесса сварки высокопрочной стали на склонность к появлению холодных трещин.

2. Экспериментально установлено, что применение «мягкой» по отношению к основному металлу сварочной проволоки Y42 способствует образованию наиболее благоприятной ферритно-бейнитной структуры с ферритом игольчатой морфологии, обладающей высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин, при его доле в структуре не менее 40 %.

3. Показано, что эффективная погонная энергия и температура начала сварки являются основными способами обеспечения сопротивления появлению холодных трещин. В частности, увеличение эффективной погонной энергии с 5,8 до 15,2 кДж/см позволило получить сварное соединение без трещин при сварке образцов при температуре минус 20 °С без предварительного подогрева.

4. Низкая сопротивляемость образованию холодных трещин порошковой проволоки Y62 при температуре начала сварки минус 20 °С обусловлена наличием в микроструктуре металла шва значительной доли малоуглеродистого мартенсита с твердостью до 370 HV0.3 и высоким уровнем растягивающих остаточных сварочных напряжений в зонах конструктивных концентраторов напряжений в пробе «Тэккен».

5. Из результатов компьютерного моделирования в ESI SYSWELD следует, что величина максимальных растягивающих остаточных сварочных напряжений линейно зависит от предела текучести наплавленного металла и температуры начала сварки. Снижение класса прочности сварочных материалов на 100 МПа позволило уменьшить величину максимальных растягивающих остаточных сварочных напряжений на 100–120 МПа и повысить сопротивляемость образованию холодных трещин.

6. Разработана методика обеспечения конструкционной прочности из условий статической прочности и усталостной долговечности. Численное исследование в программном комплексе ANSYS тавровых сварных соединений с «мягкими» швами показало, что снижение прочности сварочной проволоки на 20 % при соразмерном увеличении площади углового шва из условия равнопрочности, позволяет повысить сопротивление хрупкому разрушению до 23 % и усталостному до 40 %.

7. Разработана методика одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей и проведена её апробация с оценкой сопротивляемости сварного соединения появлению холодных трещин на пробе «Тэккен». Результаты внедрены ФАУ «Российский морской регистр судоходства» в НД № 2-020101-118 часть III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов».

8. Рекомендовано применение «мягких» сварочных материалов на 2 категории прочности по НД № 2-020101-104 ниже основного металла для нерасчетных сварных швов без ограничений, а для расчетных - после проверки их конструкционной прочности.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

– проведение экспериментальной оценки сопротивления усталостному и хрупкому разрушению тавровых сварных соединений с «мягкими» швами в диапазоне климатических температур.

– проведение экспериментальных и теоретических исследований по оценке сопротивляемости образованию ХТ сварных соединений высокопрочных сталей группы (уровня) прочности 620 – 960 МПа.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ**

### **Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:**

1. Иванов, М.А. Анализ трещиноустойчивости пробы «Тэккен» / М.А. Иванов, А.Г. Альрухайми // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2018. Т.18. №1. С. 52–57; 0,375 п.л. / 0,19 п.л.

2. Алрухайми, А.Г. Расчётная оценка прочности механически неоднородных тавровых сварных соединений высокопрочных сталей / Алрухайми А.Г., А.О. Чернявский, И.А. Иванов, А.К. Тиньгаев // Сварка и Диагностика. – 2019. – № 4. – С. 21–25; 0,31 п.л. / 0,13 п.л.

3. Ivanov M.A. Dependence of cold cracks formation from the heat input when welding of high strength steel with yield strength of 500 MPa / Ivanov M.A., Alruhaimi, A.G., Voronin, S.I. // Materials Science Forum. Vol. 946. – 2019. – P. 934–938; 0,375 п.л. / 0,145 п.л. (Scopus)

4. Алрухайми, А.Г. Воздействие на факторы образования холодных трещин сварного соединения стали 10Г2ФБЮ посредством регулирования погонной энергии / А.Г. Алрухайми, И.А. Иванов, А.К. Тиньгаев, С.И. Воронин // Сварочное производство. – 2020. – № 2. – С. 3–11; 0,56 п.л. / 0,27 п.л.

#### **Другие публикации:**

5. Алрухайми, А.Г. Обеспечение сопротивления образованию холодных трещин за счет изменения характеристик прочности сварочных материалов / А.Г. Алрухайми, М.А. Иванов // Сварка в России – 2019: Современное состояние и перспективы: тез. докл. Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона. – Томск: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2019. – С. 37; 0,0625 п.л. / 0,03 п.л.

6. Иванов, М.А. Инновационные аспекты конструктивно-технологической оптимизации сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей / И.А. Иванов, А.К. Тиньгаев, А.Г. Альрухайми // Сварка в России – 2019: Современное состояние и перспективы: тез. докл. Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона. – Томск: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2019. – С. 129–130; 0,125 п.л. / 0,04 п.л.

7. Зайцев, Н.Л. Хрупкая прочность тавровых соединений с угловыми лобовыми швами / Н.Л. Зайцев, М.А. Иванов, А.Г. Альрухайми, Ильин И.А. // Механика и процессы управления. – Материалы L Всероссийского симпозиума, посвященного 75-летию Победы. – М.: РАН, 2020. – С. 91–102; 0,75 п.л. / 0,19 п.л.

Объём 1,0 печ.л. тираж 100 экз.  
Типография ..... им. ....