

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Иванов Михаил Александрович

Челябинск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	10
1.1 Методы оценки сопротивления образованию холодных трещин высокопрочных сталей .....	11
1.1.1 Расчетные методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин.....	11
1.1.2 Экспериментальные методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин .....	17
1.2 Анализ факторов, влияющих на сопротивляемость образованию холодных трещин .....	19
1.2.1 Влияние структуры на склонность к образованию холодных трещин ...	21
1.2.2 Влияние растягивающих остаточных напряжений .....	25
1.2.3 Влияние содержания остаточного диффузионного водорода.....	27
1.3 Существующая методика одобрения технологических процессов сварки....	32
1.4 Цель и задачи исследования.....	35
2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ.....	37
2.1 Выбор проб для оценки сопротивления образованию холодных трещин ....	37
2.2 Компьютерное моделирование термомеханических процессов в программном комплексе ESI SYSWELD для обоснования области одобрения пробы «Тэккен».....	46
2.3 Обеспечение сопротивления образованию холодных трещин за счет изменения погонной энергии .....	55
2.4 Обеспечение сопротивления образованию холодных трещин за счет изменения температуры начала сварки и прочностных характеристик проволок.....	66
2.4.1 Объект исследования.....	66
2.4.2 Методика испытаний.....	68
2.4.3 Оценка сопротивляемости образованию холодных трещин по результатам испытаний проб «Тэккен».....	72

2.4.4 Результаты металлографических и дюрOMETрических исследований.....	75
2.4.5 Результаты численного моделирования остаточных напряжений в пробе «Тэккен».....	79
2.5 Выводы по главе 2.....	83
3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С «МЯГКИМИ» УГЛОВЫМИ ШВАМИ .....	86
3.1 Методика расчётной оценки прочности .....	86
3.1.1 Анализ возможности хрупкого разрушения.....	90
3.1.2 Анализ возможности вязкого разрушения.....	91
3.1.3 Анализ возможности квазихрупкого разрушения.....	93
3.1.4 Прочность и долговечность при циклическом нагружении.....	95
3.2 Численное моделирование прочности сварных соединений.....	96
3.2.1 Оценка хрупкого разрушения.....	96
3.2.2 Оценка вязкого разрушения.....	99
3.2.3 Оценка вязко-хрупкого разрушения .....	100
3.2.4 Прочность и долговечность при циклическом нагружении.....	104
3.2.5 Перспективы развития предлагаемой методики.....	105
3.3 Выводы по главе 3.....	110
4. РАЗРАБОТКА И ОПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОДОБРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ С ОЦЕНКОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН .....	112
4.1 Методика одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей с оценкой сопротивления сварного соединения образованию холодных трещин.....	112
4.2 Апробация методики одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей с оценкой сопротивления образованию холодных трещин.....	116
4.3 Выводы по главе 4.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	129

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программа испытаний образцов имитаторов сварных соединений на пробах «Тэккен».....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты и протоколы испытаний проб «Тэккен».....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт внедрения результатов работы в нормативные документы Российского морского регистра судоходства.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Сертификат RUSMETALCON.....	172

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы**

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 исследования.**

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 образования ХТ [7–10] 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 [11–15].

**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 РСЕ500ТМ рекомендуется выполнять «мягкими» сварочными материалами категории Y42 без предварительного подогрева в диапазоне температур от  $-20$  °С 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, дюрOMETрические – 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.

## **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.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность своему научному руководителю, заведующему кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» к.т.н. Иванову Михаилу Александровичу за предоставленную интересную тему для исследований, каждодневную помощь, внимание и интерес к работе, доценту кафедры ОиТСП к.т.н. Тиньгаеву Александру Кирилловичу за наставления и поддержку в работе, профессору кафедры технической механики д.т.н. Чернявскому Александру Олеговичу за консультирование в части численных расчетов, инженеру АО РусНИТИ Сулеймановой Ильсие Ишмуратовне за помощь в расшифровке микроструктуры образцов. Также автор выражает благодарность всему коллективу кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета за поддержку, доброе отношение и участие в обсуждении результатов диссертации.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Широкое внедрение высокопрочных сталей категории прочности от 500 до 690 МПа в судостроение позволит повысить надежность судов, стационарных платформ, буровых плавучих установок, а также позволит снизить материалоемкость конструкции судна и повысит его экономичность. Особенно актуально внедрение высокопрочных сталей в судокорпусные конструкции, эксплуатируемые при отрицательных температурах, так как повышается риск появления холодных трещин (далее – ХТ) [29, 46] и необходимо проводить оценку свариваемости [42, 71, 88], которая является достаточно трудоемким процессом.

Известно, что ХТ зарождаются, как правило в течение двух – пяти часов после сварки, после чего идет их рост, который может продолжаться вплоть до нескольких суток [47, 69, 70].

Появление ХТ многие авторы [57, 69, 70, 71, 81, 89] связывают со следующими факторами: наличием неблагоприятных закалочных структур [107], высоких остаточных растягивающих напряжений и наличием высокой концентрации диффузионного водорода в сварном шве [79].

Разработкой мероприятий по предотвращению образованию ХТ занимаются многие ученые в течение значительного интервала времени как в России, так и за рубежом [71, 74, 88, 111]. В результате были разработаны как рекомендации по снижению риска образования ХТ, так и методы расчетной и экспериментальной оценки склонности основного металла и сварных соединений к образованию ХТ [23, 40, 74, 78], причем некоторые из них включены в различные Российские и международные стандарты, в том числе в судостроительную международную ассоциацию классификационных обществ (далее – МАКО) (англ. International Association of Classification Societies, IACS) [1, 18, 35, 45, 93].

## 1.1 Методы оценки сопротивления образованию холодных трещин высокопрочных сталей

Рассмотрим методы оценки появления холодных трещин, которые подразделяются на расчетные и экспериментальные методы (рисунок 1.1). Расчетные методы базируются на оценке химического состава основного металла и позволяют в первом приближении оценить наличие неблагоприятных закалочных структур и, соответственно, способность металла сопротивляться образованию холодных трещин. Экспериментальные методы нацелены на проверку технологии сварки при различных температурах начала сварки, погонных энергиях, конструктивных параметрах швов и жесткости напряженного состояния.

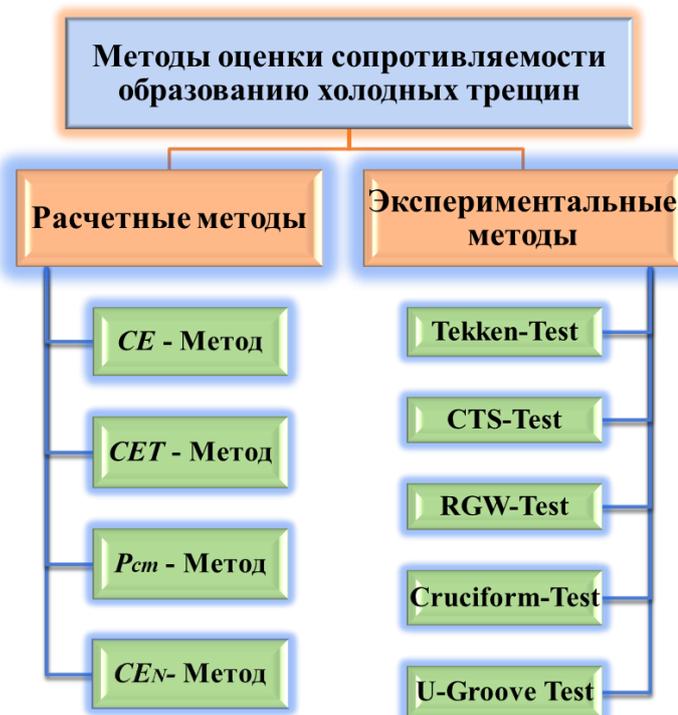


Рисунок 1.1 – Методы оценки появления холодных трещин

### 1.1.1 Расчетные методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин

Алгоритм нормативных процедур [1, 18, 35, 45, 93] по предотвращению образования в сварных соединениях холодных трещин представлен далее.

А. Риск появления в стали ХТ должен быть подтвержен при прохождении процедуры её одобрения российским морским регистром судоходства для изготовления деталей корпуса судна.

Б. Оценка способности стали сопротивляться появлению ХТ, как правило, проводится анализом её химического состава расчетными методами:

#### 1. CE-Метод испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}, \quad (1.1)$$

где  $C_{eq}$  – углеродный эквивалент по методу CE, %;  $C$  – содержание углерода, %,  $Mn$  – содержание марганца, %;  $Cr$  – содержание хрома, %;  $Mo$  – содержание молибдена, %;  $V$  – содержание ванадия, %;  $Ni$  – содержание никеля, %;  $Cu$  – содержание меди, %.

Данный метод основывается на исходном понятии критической твердости [19, 20], позволяющей избежать появления холодных трещин в зоне термического влияния (ЗТВ). Он был разработан эмпирически и включил в себя обширные результаты исследований на склонность к образованию закалочных структур зоны термического влияния и испытаний на сопротивляемость образованию трещин, причем последние в основном были испытаниями на регулируемую термическую жесткость на пробах CTS. В существующем общем формате данный метод испытания был первоначально опубликован в 1973 году и, с изменениями и обновлениями, непрерывно включался в Британские стандарты в течение почти 25 лет [12]. Опыт его использования как в Великобритании, так и в других местах, был в высшей степени удовлетворительным для сталей того времени.

В зависимости от углеродного эквивалента, толщины свариваемых деталей, содержания водорода выбирается температура подогрева по номограммам в соответствии с EN-1011-2 [12]. Принято считать, что превышение углеродного эквивалента свыше 0,45 сталям требуется предварительный подогрев.

#### 2. CET-Метод испытания на сопротивляемость появления холодных трещин

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40}; \quad (1.2)$$

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times \tanh(d/35) + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \quad (1.3)$$

Здесь  $T_p$  – температура подогрева (начала сварки), °С;  $\tanh$  – гиперболический тангенс;  $d$  – толщина свариваемой детали, мм;  $HD$  – содержание водорода, мл/100 г;  $Q$  – погонная энергия, кДж/мм.

Это соотношение действительно для конструкционных сталей с пределом текучести до 1000 Н/мм<sup>2</sup> и значениями

СЕТ = от 0,2 % до 0,5 %;

$d$  = от 10 мм до 90 мм;

$HD$  = от 1 мл/100 г до 20 мл/100 г;

$Q$  = от 0,5 кДж/мм до 4,0 кДж/мм.

Данный метод применяется для последующего расчета минимальной температуры предварительного подогрева перед сваркой и основывается на результатах испытания на сопротивляемость к появлению холодных трещин на пробах с У-образной разделкой кромок проба «Tekken» [37]. Были также включены данные сварки с угловым швом, вытекающие из испытаний на пробах СТС. Внутренние напряжения в однопроходных угловых сварных швах проба СТС значительно ниже, чем при сварке корня шва в стыковых сварных швах с У-образной разделкой кромок проба «Tekken» [37].

Исследования были выполнены в начале 80-х гг. и опубликованы в ПВ-документах (Международного института сварки) IX-1630-91 и IX-1631-91. После успешного применения, в частности при сварке низколегированных сталей высокой прочности с пределами текучести до 960 МПа (Н/мм<sup>2</sup>), метод был введен в Stahl Eisen Werkstoffblatt, SEW 038 – немецкую национальную директиву по сварке [58]. Было доказано, что применение метода предварительного подогрева сварных соединений создает условия, предотвращающие появления холодных трещин.

Согласно результатам обширных исследований [39, 40, 70, 71], возникновение холодных трещин в выполненных сварных соединениях обусловлено химическим составом основного и наплавленного металлов, толщиной свариваемых листов, содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле, величиной эффективной погонной энергии во время сварки и напряженным состоянием. Этот метод рассматривает дуговую сварку сталей групп от 1 до 4, как указано в CR ISO 15608

[76]. Рекомендации, приведенные в данном источнике, следует рассматривать в соответствующем WPS (Welding Procedure Specification) [33].

Очень эффективным средством для избежания холодных трещин является подогрев сварного шва до более высоких температур, чтобы задержать охлаждение околошовной зоны и тем самым поспособствовать диффузии водорода в более коротком промежутке времени, в большей степени, чем после сварки без подогрева [41]. Кроме того, подогрев уменьшает уровень внутренних напряжений. Для получения многослойных сварных швов иногда можно начинать без подогрева [41], если достижима достаточно высокая температура между проходами и если она поддерживается с помощью сопутствующего подогрева от сварочной дуги.

### 3. $P_{cm}$ -Метод на основе контроля содержания водорода

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B. \quad (1.4)$$

Метод на основе контроля содержания водорода основывается на предположении [17, 50], что образование холодных трещин не будет происходить, если среднее количество водорода, остающегося в сварном соединении после его остывания приблизительно до 50 °С, не превышает некоторую критическую величину, зависящую от химического состава стали. Предварительный подогрев, необходимый для обеспечения выделения из сварного соединения достаточного количества водорода, может быть оценен с использованием данного метода [16].

Данный метод базируется главным образом на результатах испытания с закреплением стыкового сварного шва с частичным проплавлением. Металл сварного шва, используемый при испытаниях, соответствует основному металлу. Обширные испытания данного метода на угловых сварных швах не проводились, однако, учитывая закрепление, метод был соответственно адаптирован именно для таких сварных швов.

Метод на основе контроля содержания водорода  $P_{cm}$  основывается на выполнении однопроходного шва на низкой эффективной погонной энергии [17], представляющего собой корневой слой, и предполагает упрочнение ЗТВ. Поэтому данный метод особенно полезен для высокопрочных низколегированных сталей, имеющих

весьма высокую способность к закаливанию, если контроль твердости не всегда выполним. Следовательно, так как при его использовании предполагается, что ЗТВ полностью закаливается, прогнозируемый предварительный подогрев может быть слишком завышенным для современных углеродистых низколегированных сталей.

#### 4. $CE_N$ -Метод испытания на сопротивляемость появления холодных трещин

$$CE_N = C + f(C) \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+V}{5}, \quad (1.5)$$

$$f(C) = 0,75 + 0,25 * \text{tg} (20(C - 0,12)),$$

где  $f(C)$  – коэффициент, который уменьшается при уменьшении содержания углерода.

Данный метод преимущественно основывается на результатах испытания У-образного соединения (проба Tekken) [10, 15, 37], который в течение долгого времени применялся в Японии изготовителями стали при исследовательских испытаниях по оценке свариваемости вновь разработанных изготовителем сталей и при квалификационных испытаниях технологического процесса сварки низколегированных сталей. Данный метод был первоначально опубликован в 1989 году и описан с изменениями в журнале *Welding in the World*, издание 35, № 5, с. 327–334, 1995 [63].

В ISO 17844-2012 [82] отмечается, что данный метод специализируется на высокопрочных сталях и при оценке температуры подогрева помимо водорода, погонной энергии и толщины свариваемых деталей также оценивает предел текучести металла сварного шва.

Сравнительная таблица расчетных методов представлена в таблице 1.1. Наиболее подходящим методом для оценки появления холодных трещин сталей высокой прочности является метод  $CE_N$ , который подходит для оценки стыковых соединений, но не адаптирован для угловых сварных соединений. Также в ISO 17844-2012 [82] отмечается, что результаты расчета следует брать во внимание только для первичной технологии, которая обязательно должна проверяться натурными испытаниями.

Таблица 1.1 – Сравнение методов расчетной оценки углеродного эквивалента и температуры подогрева

Метод	Типы сталей, для которых разработан метод	Граничные значения метода	Максимальная толщина листа, мм	Тип соединения		Уровень содержания водорода, мл/100 г	Учет погонной энергии при расчете температуры подгрева
				стыковое	угловое		
CE	Углеродистые, марганце-вистые, некоторые низколегированные	$0,30 \leq CE \leq 0,70$	100	+	+	5 диапазонов	только для стыковых
SET		$0,20 \leq SET \leq 0,50$	100	+	–	от 1 до 20	+
Rcm	Углеродистые, марганце-вистые, некоторые низколегированные, за исключением закаленных и отпущенных	–	100	+	+	3 диапазона	–
CE <sub>N</sub>	Низколегированные, в том числе высокопрочные	$0,20 \leq CEN \leq 0,60$	200	+	–	от 1 до 20	только для стыковых

\*Повышенные значения температуры подогрева.

При разработке и одобрении новых марок сталей для применения в судостроении также проводят дополнительные натурные испытания на известных пробах, таких как Имплант, Lehigh, CTS, «Тэккен» и др. [1, 35, 37, 45]. Однако их использование в судостроении полностью не регламентировано. Исключение составляет руководство п.5.3 [94], в котором предложен образец и методика оценки сопротивления сварного соединения образованию ХТ, которые отличаются от общепринятых и рекомендованных для этих целей в международной практике [78]. В настоящее время действие документа [94] отменено. Следует отметить, что рассмотренные в данном разделе расчетные методы были сформулированы достаточно давно, до применения в промышленности современных экономнолегированных высокопрочных сталей, в которых повышение механических характеристик (прочности, пластичности) стали [72] обеспечивается не столько за счет системы легирования, сколько за счет проведения термической и термомеханической обработки металла

[48, 49]. Поэтому разработанные ранее и применяемые в настоящее время расчетные зависимости для оценки сопротивляемости стали зарождению ХТ требуют корректировки [67, 68, 98]. Оценка свариваемости высокопрочных сталей нового поколения только с позиции анализа их химического состава недостаточна, т.к. в этом случае не учитываются технологические особенности процесса сварки, в частности скорость охлаждения металла сварного шва, которая оказывает существенное влияние на зарождение ХТ [82, 83].

Из результатов проведенного анализа следует, что существующие расчетные критерии оценки склонности к образованию ХТ ( $SE$ ,  $SET$ ,  $R_{cm}$ ,  $SE_N$ ) не позволяют должным образом оценить качество основного и сварочного материалов для судокорпусных конструкций, поэтому наиболее достоверными методами оценки сопротивляемости образованию ХТ являются экспериментальные методы.

Учитывая вышеизложенное, можно констатировать, что применяемые в настоящее время в Правилах РС критерии и методы расчетной оценки сопротивляемости высокопрочных сталей образованию ХТ не гарантируют их отсутствия в сварных соединениях судокорпусных конструкций [91, 99].

Поэтому далее необходимо рассмотреть экспериментальные методы оценки сопротивляемости образованию ХТ, которая отсутствует в нормативных документах РС.

### **1.1.2 Экспериментальные методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин**

На протяжении многих лет был разработан широкий спектр проб для испытаний на свариваемость. Их конструкции предполагают испытания с различными уровнями жесткости [38, 39]. В таблице 1.2 перечислены различные методы испытаний на свариваемость на пробах с приложением внешней нагрузки и испытания на пробах с естественной жесткостью.

Таблица 1.2 – Обзор методов испытаний на свариваемость [38]

Тип пробы	Внутренняя и внешняя нагрузка	Изгиб и растяжения	Продольная и поперечная нагрузка	Оцениваемый параметр
One-side lifted pipe [28]	Внешний	Изгиб	Поперечный	Длина трещины изгибающаяся
Four-point bending pipe [50]	Внешний	Изгиб	Поперечный	Длина трещины изгибающаяся
Cranfield test [64]	Внутренний	Растяжения	–	Длина трещины
WIC test [50, 16, 2, 56]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Предварительный нагрев
M-WIC test [42]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Предварительный нагрев
Implant test [23,44, 56,46, 57, 61,11,77]	Внешний	Растяжения	Поперечный	Напряжение
t test [64]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
Bending test [43, 54]	Внешний	Изгиб	Поперечный	Прогиб длины трещины
Tensile restraint cracking TRC test [64]	Внешний	Растяжения	Поперечный	Нагрузка
Rigid restraint cracking RRC tes [3]	Внешний	Растяжения	Поперечный	Нагрузка
Window-type cruciform restraint test [64]	Внутренний	Растяжения	–	Длина трещины
Controlled thermal severity CTS test [41]	Внутренний	Растяжения	–	Уровень трещины
Gapped bead-on-plate G-BOP test [30, 29, 47]	Внутренний	Растяжения	Продольный	Длина трещины
One-plate self-restraint weldability test [28]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Предварительный подогрев
Restraint circular weldability test [64]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
Lehigh U-groove, or Stout, test [36, 28]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
Lehigh slot test [61, 62]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины

Тип пробы	Внутренняя и внешняя нагрузка	Изгиб и растяжения	Продольная и поперечная нагрузка	Оцениваемый параметр
Tekken test, or y-groove restraint test [37, 56]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Предварительный подогрев
Instrumented restraint cracking IRC test [64]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
Restraint root cracking test, or Schnadt-Fisco test [50]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
H-slit restraint test [64]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Длина трещины
Window-type restraint multiple-layer cracking [59]	Внутренний	Растяжения	Поперечный	Ограничение длины трещины

Таким образом, существует большое количество экспериментальных методов оценки возникновения холодных трещин, из которых необходимо выбрать наилучший, который обеспечивает наибольшие растягивающие напряжения в сварном соединении. Далее необходимо оценить влияние факторов на склонность к возникновению трещин.

## **1.2 Анализ факторов, влияющих на сопротивляемость образованию холодных трещин**

Основными факторами (рисунок 1.2), способствующими образованию ХТ, являются закалочные структуры, образующиеся в ЗТВ сварного соединения, растягивающие остаточные напряжения (ОС), и диффузионный водород, локализуемый в результате действия остаточных напряжений в зоне их максимальной концентрации в устье трещины [71]. Для установления причин образования ХТ в сварных соединениях корпуса судна проанализируем как влияют эти параметры, исходя из результатов проведенных исследований сварочных материалов [1, 35, 45, 93], которые одобрены для выполнения сварных соединений высокопрочных сталей.



Рисунок 1.2 – Анализ факторов, влияющих на появление холодных трещин

На рисунок 1.2 представлена блок-схема основных факторов, которые влияют на появление холодных трещин при сварке. Представленные факторы объединены в отдельные блоки и разбиты на три уровня, которые связаны между собой причинно-следственными связями. Наличие такой схемы позволяет визуализировать исследуемую проблему, выделить наиболее значимые факторы и проранжировать способы их устранения с позиции минимизации материальных затрат и времени.

Начнём с оценки закаляемости основного и наплавленного металла сварных соединений. Структура металла зависит от его химического состава и скорости его охлаждения в интервале восемьсот – пятьсот градусов Цельсия. На скорость охлаждения влияет погонная энергия, толщина металла и температура предварительного подогрева. Поэтому структура металла образцов определяется в основном её химическим составом, который можно оценить по показателям углеродного эквивалента  $Seq$ ,  $SET$ . Если проанализировать степень влияния диффузионного водорода на результаты испытаний, полученные в ходе оценки риска образования появления ХТ в сварных соединениях, то здесь следует отметить, что диффузионный водород в сварном соединении распределяется неравномерно [56]. При равной средней концентрации водорода по сварному соединению, его максимальная локализация будет на участках с максимальными растягивающими напряжениями, которая может отличаться в несколько раз от средней по сечению [56].

### 1.2.1 Влияние структуры на склонность к образованию холодных трещин

Известно [108], что при сварке стали выделения новых фаз из переохлажденного аустенита происходит в более сложных термомеханических условиях по сравнению с теми, которые наблюдаются при обычной термической обработке [73, 110].

Из результатов исследований, приведенных в работах [62, 68, 111] следует, что тип и морфология структур, образующихся в зоне термического влияния оказывают серьезное влияние на технологическую прочность высокопрочных сталей. Применительно к рассматриваемым сталям, структура с глобулярной формой карбидов является более предпочтительной, так как она в меньшей степени способствует формированию дополнительных микронапряжений, которые возникают в процессе кристаллизации сварочной ванны.

В работах [62, 68] изучена зависимость особенностей структуры участка перегрева ЗТВ сварного соединения от времени нахождения металла выше 1250 °С (таблица 1.3). При погонной энергии сварки  $q_p$ , изменяющейся от 20,6 до 27,7 кДж/см, что соответствовало времени пребывания металла в зоне перегрева от 7,0 до 12,6 с, формируются структуры зернистой морфологии, а присварке на меньшей погонной энергии (17,5 – 13,0 кДж/см), что соответствовало времени пребывания металла в зоне перегрева от 3,5 до 5,4 с – игольчатой. Из этого следует, что структура и свойства участка перегрева ЗТВ сварного соединения определяется размером и однородностью зерна аустенита, которые напрямую зависят от параметров режима сварки.

Если ударная вязкость ЗТВ сварного соединения для определенной марки стали оказалось не ниже нормативного значения, то условия сварки должны быть выбраны таким образом, чтобы время охлаждения  $t_{8/5}$  соответствовало этому значению. Если твердость ЗТВ сварного соединения для данной марки стали не превышает максимально допустимого значения, то условия сварки должны быть выбраны таким образом, чтобы время охлаждения  $t_{8/5}$  не падало ниже этого значения. При таком подходе зависимости ударной вязкости [75] и твердости относительно  $t_{8/5}$  для конкретных сталей должны быть известны.

Таблица 1.3 – Влияние режимов сварки на формирование структуры ОШЗ

№ п/п	Погонная энергия сварки $q_p$ , Дж/см	Время пребывания металла при температуре выше 1250 °С, с	Размер устеничного зерна, No по ГОСТ 5639-82	Структура ОШЗ
1	41896...35050	28,8...20,2	2...4	Феррит, перлит и верхний бейнит
2	27712...20584	12,6...7	5...9	Мезоферрит и зернистый бейнит
3	17500...13000	5,4...3,5	2...4	Нижний бейнит и мартенсит

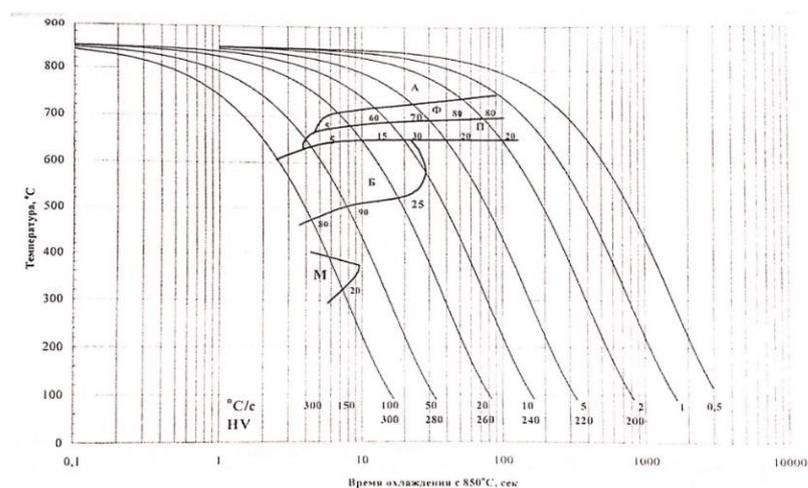


Рисунок 1.3 – Термокинетическая диаграмма листового проката из стали 10Г2ФБЮ (аналог PCE500TM) [113]

Так, например, для сталей типа 10Г2ФБЮ, соответствующее время охлаждения  $t_{8/5}$  заполняющих и облицовочных проходов, как правило, лежит в пределах от десяти до двадцати пяти секунд. Не запрещено изготовление сварных швов указанных сталей с другим временем охлаждения  $t_{8/5}$ , при условии, что для каждого отдельного случая соответствующие проверки были сделаны на основе испытания процесса сварки в соответствии с EN 288-3:1997 или предварительного производственного испытания в соответствии с EN 288-8:1995 и при условии, что структурные требования для компонента выполнены. Если нет доступных термокинетических кривых, температур фазовых превращений и твердости, то относительно  $t_{8/5}$

рекомендуются испытания сварочных процедур в соответствии с EN 288-3:1997 или EN 288-8:1995.

Для определения морфологии феррита в высокопрочных сталях необходимо проведение их классификации. Под игольчатым ферритом понимается нерегулярно расположенные пластины и рейки феррита различной величины со вторичной фазой (мелкие островки цементита или мартенситно-аустенитная (МА) составляющая). Игольчатый феррит зарождается внутри аустенитных зерен [112] на неметаллических включениях (рисунок 1.4)

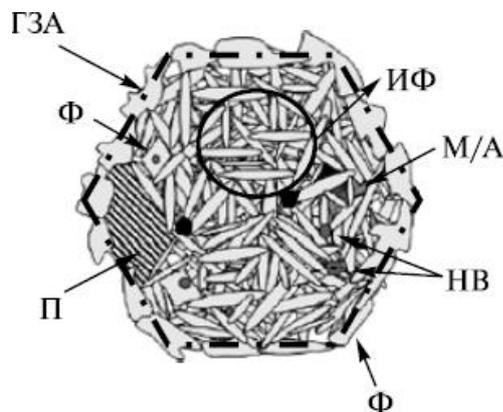


Рисунок 1.4 – Схема строения участка игольчатого феррита в пределах одного аустенитного зерна (ГЗА — граница зерен аустенита, Ф – феррит, ИФ – игольчатый феррит, М/А – мартенситно-аустенитная составляющая, П – перлит, НВ – неметаллические включения)

В классификации междунродного института сварки [80] под игольчатым ферритом понимается как феррит, зарождающийся на включениях, расположенных внутри аустенитных зерен в течение  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в процессе множественных столкновений между зернами.

В работе [103] игольчатый феррит называют игольчатым бейнитом (ИБ) (рисунок 1.5). Он зарождается также на неметаллических включениях – оксидах ( $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.)

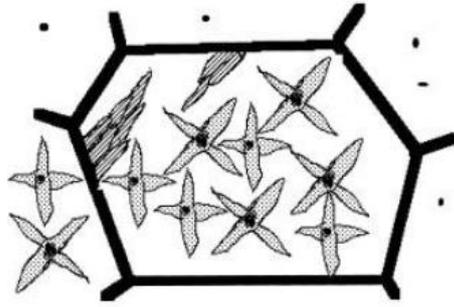


Рисунок 1.5 – Схема образования игольчатого бейнита на неметаллических включениях [103]

С точки зрения сопротивления образованию холодных трещин наиболее предпочтительной является структура игольчатого феррита. Для образования игольчатого феррита необходимо наличие мелкодисперсных избыточных фаз карбидов, нитридов и карбонитридов тугоплавких металлов, равномерно растворенных в аустените. Наличие таких фаз способствует зарождения хаотично ориентированных коротких игл феррита, которые препятствуют развитию как технологических, так и эксплуатационных трещин.

Что касается микротвердости отдельных структурных составляющих [90]:

Мартенсит, формирующийся в виде пластин или реек трудно различается под оптическим микроскопом, так как не видны отдельные рейки вследствие того, что они сильно дисперсные.

Что касается бейнита, то он зарождается на границах аустенитного зерна и растет внутрь колониями / пластинами.

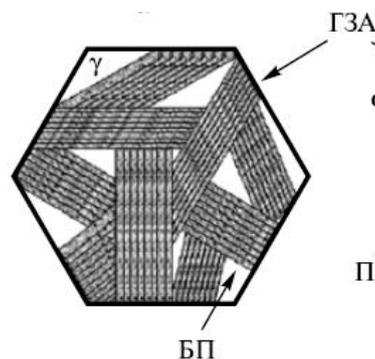


Рисунок 1.6 – Схема строения бейнитной колонии

Таким образом, для оценки морфологии феррита необходимо проведение микрострукторного анализа и дюрOMETрических исследований (определение твердости).

### 1.2.2 Влияние растягивающих остаточных напряжений

Обычно считалось, что остаточные напряжения оказывают основное влияние на формирование холодных трещин [39, 71]. Обширные данные испытаний на свариваемость подтверждают это предположение, когда более высокие приложенные напряжения в конечном итоге приводят к образованию трещин [110]. Здесь важно подчеркнуть, что, именно локальные напряжения в окрестности каждого микроструктурного элемента имеют первостепенное значение для моделей растрескивания, и эти напряжения не могут быть легко измерены. Микромеханические испытания [8, 97] позволяют выделить индивидуальное поведение элемента сварного шва, насыщенного водородом, и помогут понять распределение напряжений внутри сварного шва. При сварке сложного, многопроходного соединения конструкций возникают остаточные напряжения, которые влияют на свариваемость. Наличие растягивающего напряжения, образующегося при сварке и охлаждении, усугубляет трещину. В таблице 1.4 приведен допустимый интервал категорий сварочных проволок в зависимости от категории стали в судостроении. Хорошо видно, что разрешается применение только равнопрочной или более прочной проволоки.

Согласно [12, 87] примем, что максимальная величина остаточных сварочных напряжений напрямую зависит от предела текучести наплавленного металла, т.е. с увеличением предела текучести увеличиваются остаточные напряжения в сварном шве. В таком случае применение более прочных сварочных материалов, при прочих равных условиях, должно привести к повышению вероятности образования холодных трещин, что подтверждается результатами испытаний, что с увеличением предела текучести наплавленного металла увеличивается значение коэффициента растрескивания, свидетельствующего о снижении сопротивляемости металла сварочного соединения образованию ХТ.

Таблица 1.4 – Области применения категорий сварочных материалов в зависимости от категории прочности стали в судостроении [92]

Идентификация категорий сварочных материалов по уровню прочности	Идентификация категорий высокопрочной стали по уровню прочности					
	(A/F)420	(A/F)460	(A/F)500	(A/F)550	(A/F)620	(A/F)690
(3Y/5Y)42	+	–	–	–	–	–
(3Y/5Y)46	+	+	–	–	–	–
(3Y/5Y)50	+	+	+	–	–	–
(3Y/5Y)55	–	–	+	+	–	–
(3Y/5Y)62	–	–	–	+	+	–
(3Y/5Y)69	–	–	–	–	+	+

В то же время металл шва, наплавленный сварочной проволокой DSII81K2, который обладает минимальным пределом текучести, оказался не склонным к образованию ХТ хотя данная проволока относится к менее хладостойкой по сравнению с проволокой DSII91LT. Факт положительного влияния «мягких» швов на сопротивляемость образованию ХТ высокопрочных сталей известен давно и рекомендуется к применению в ряде нормативных документов [22]. Под «мягким» швом в данном случае будем понимать наплавленный металл, у которого показатели прочности ниже, чем у основного металла (в нашем случае) как минимум на две категории по НД № 2-020101-104. Для снижения риска образования ХТ производители высокопрочных сталей [32] рекомендуют, корень сварного шва проваривать более «мягкими» сварочными материалами с меньшим пределом текучести (рисунок 1.7).

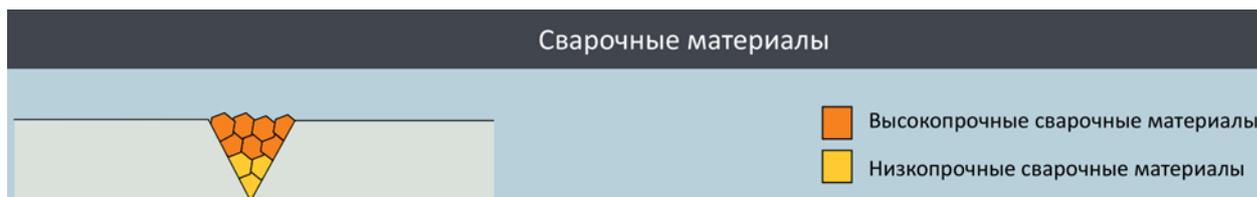


Рисунок 1.7 – Рекомендации по выбору сварочных материалов от производителя высокопрочных сталей SSAB Strenx™ [32]

На рисунке 1.7 показана схема расположения сварочных валиков по высоте сварного шва, в корне сварного шва выполняется сварка низкопрочными (мягкими) сварочными материалами, второй и третий заполняющие валики также выполнены мягкими материалами, далее заполнение разделки кромок и выполнение облицовочного сварного шва происходит высокопрочными материалами.

Таким образом, в литературных источниках подтверждается влияние предела текучести сварочной проволоки на склонность к образованию растягивающих напряжений. Однако необходимо в ходе дальнейшей работы провести численное моделирование температурных полей, напряженно-деформированного состояния сварных соединений [66,84, 85], а также натурный эксперимент с различными проволоками.

### **1.2.3. Влияние содержания остаточного диффузионного водорода**

Диффузный водород, присутствующий в стальных сварных конструкциях, зависит от свойств материала [3, 11]. Во время процессов дуговой сварки диссоциация молекул воды в высокотемпературной плазме дуги генерирует ионы водорода, которые поглощаются жидкой сварочной ванной (рисунок 1.8). В газовой дуговой (GMA [26]) сварке [59], используются инертные газы, которые защищают от атмосферной влаги [52]. В таких процессах, как дуговая сварка в защитном металле (SMAW [26]), дуговая сварка с наплавкой (FCAW [26]) и дуговая сварка под флюсом (SAW [26]), флюс используется для предотвращения окисления расплавленного металла. Необходимо в процессе сварки избежать поглощения влаги и наплавить металл сварного шва с небольшим содержанием водорода [100, 109]. В условиях производства существуют трудности в измерении количества диффузионного водорода, присутствующего в сварном шве [43]. Наиболее популярные методы включают глицериновый метод, ртутный метод и метод газовой хроматографии [25]. Каждый метод дает разные значения водорода для данного сварного шва из-за некоторого поглощения водорода материалом (таким как глицерин) [43]. Кроме того, методы горячей экстракции позволяют определить общее количество водорода, присутствующего в сварном шве, для определения места

улавливания по температуре, при которой он выделяет водород. Статистические данные по инструментам, которые используются для оценки восприимчивости к появлению ХТ в металле сварного шва, учитывают содержание водорода в сочетании с термическим циклом [28, 101].

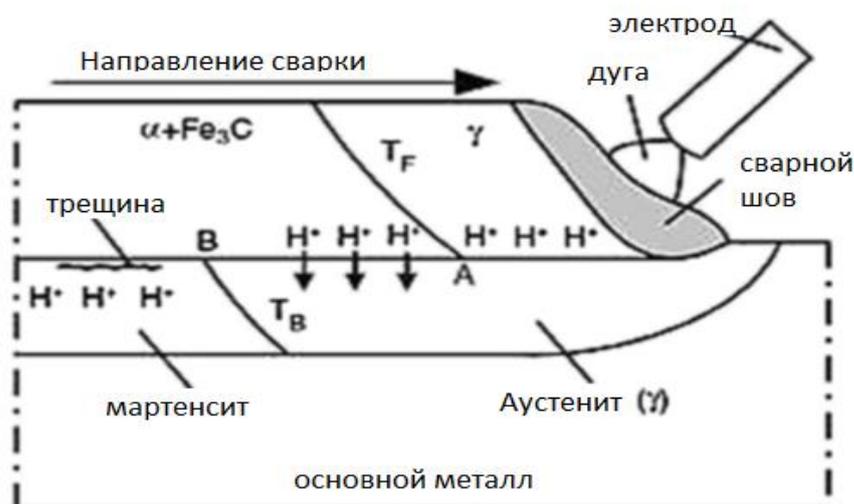


Рисунок 1.8 – Схематическое изображение диффузии водорода в сталях [86]

На рисунке 1.8 представлена схема диффузии атомарного водорода при сварке высокопрочных закаливающихся сталей. Согласно рис. 1.8 в процессе формирования сварного соединения большая часть атомарного водорода концентрируется в наплавленном металле [70], который попадает в него из окружающей среды в процессе горения электрической дуги. Впоследствии избыточный водород диффундирует из металла шва в ЗТВ сварного соединения, в которой происходят фазовые превращения и формируются остаточные сварочные напряжения. При образовании в ЗТВ значительной доли мартенситной фазы (более 50%), существует высокая вероятность образования холодных трещин [54, 56, 61].

Поэтому со снижением температуры выполнения работ по сварке снижается скорость выхода диффузионного водорода (рисунок 1.9) [91], что повышает риск появления трещин, развивающихся по механизму замедленного разрушения, в течение времени большего, чем это принято в нормативно-технических документах Российского морского регистра судоходства, регламентирующих неразрушающий контроль сварных соединений [92].

Автором работы [91] было установлено, что при температуре среды ниже минус двадцати двух градусов по шкале Цельсия выход диффузионного водорода из наплавленного металла наблюдается по истечению трех суток. При дальнейшем снижении температуры окружающей среды до минус пятидесяти градусов по шкале Цельсия, выход водорода был зафиксирован по истечению 200 часов после выполнения сварочных работ (см. рисунок 1.9 б).

В работе также отмечается, что при температуре окружающей среды 20 °С из металла исследуемого образца стали категории Y42 выделилось около 3 см<sup>3</sup>/100 г [Н], при минус 30 °С – 0,85 см<sup>3</sup>/100 г, а при минус 45 °С – 0,2 см<sup>3</sup>/100 г.

Из рисунка 1.3 видно, что диффузионный водород может выделяться из наплавленного металла в течение более длительного промежутка, чем это предусмотрено требованиями РС, что не может гарантировать не появления ХТ в сварном соединении. Решение данной проблемы возможно путем дополнения процедуры неразрушающего контроля дублирующим контролем.

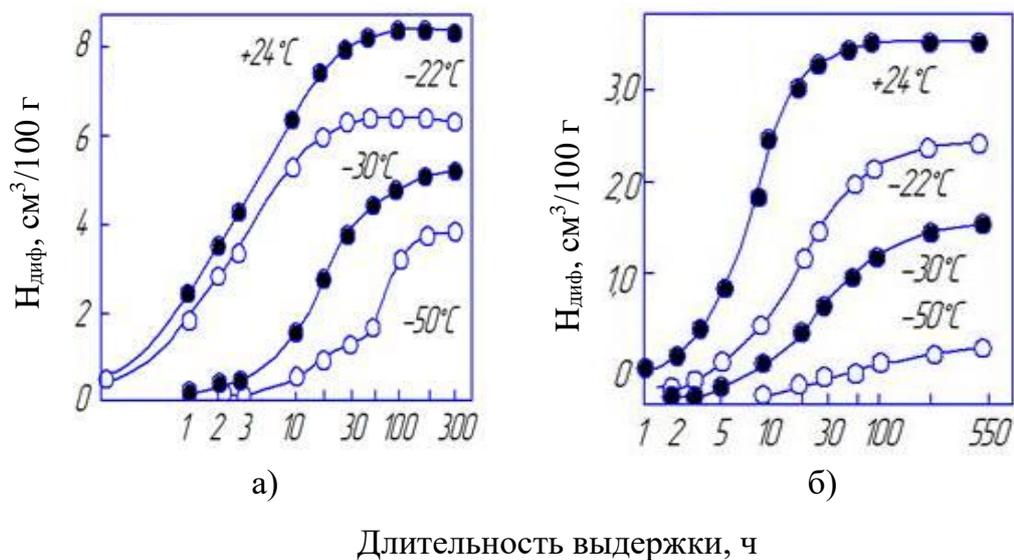


Рисунок 1.9 – Зависимость скорости выделения водорода из наплавленного металла от температуры среды: электроды АНО – 26 (Y42); а) проба глицериновая; б) проба спиртовая [91]

Выбор периода выполнения дублирующего дополнительного контроля предложено в работе [70], в которой зарождение ХТ в металле шва находится в зависимости от толщины металла и температуры начала сварки, а также от хим.состава и категории прочности сталей (таблицы 1.8, 1.9).

По результатам этой работы [96] в нормативный документ ОР-91.200.00-КТН-074-12 ПАО «Транснефть» были внесены рекомендации по проведению дублирующего визуального контроля сварных швов из сталей класса прочности К56 и выше. Аналогичные требования встречаются в нормативных документах ПАО Газпром [105, 106, 108].

Согласно [96] для высокопрочных сталей класса выше К60 (PCE500TM) время до проведения дублирующего контроля должно быть, как минимум 10 дней после того, как был выполнен первичный контроль.

Таблица 1.5 – Время десорбции диффузионного водорода до  $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  из сварных соединений стали класса прочности К56-К60 ( $C_{\text{экв}} < 0,41\%$ ) [69, 71]

Толщина стенки, мм, включительно	Время проведения дублирующего контроля после сварки, сутки							
	Температура окружающего воздуха во время сварки, °С							
	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30	От -40 до -30
От 8 до 12	5	5	4	4	4	3	2	2
Свыше 12 до 16	6	6	5	5	5	4	3	3
Свыше 16 до 20	8	7	7	7	7	5	4	4
Свыше 20 до 22	11	10	9	8	8	6	4	4
Свыше 22 до 24	14	13	12	11	10	8	5	5
Свыше 24 до 26	17	16	14	13	11	9	6	6
Свыше 26 до 28	21	19	17	16	14	11	7	7
Свыше 28 до 30	24	22	21	19	17	13	8	8
Свыше 30 до 33	30	27	25	22	20	15	10	10

Таблица 1.6 – Время десорбции диффузионного водорода до  $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  из сварных соединений стали класса прочности К56-К60 ( $C_{\text{экв}} = 0,42 \dots 0,46\%$ ) [69, 71]

Толщина стенки, мм, включительно	Температура во время выполнения сварки, °С							
	Время дублирующего контроля, сутки, включительно							
	От -40 до -30	От -30 до -20	От -20 до -10	От -10 до 0	От 0 до +10	От +10 до +20	От +20 до +30	От +30 до +40
От 8 до 12	6	6	5	5	4	4	3	3
Свыше 12 до 16	8	8	7	7	6	5	4	4
Свыше 16 до 20	11	10	10	9	9	7	5	5
Свыше 20 до 22	13	12	11	10	10	8	6	6
Свыше 22 до 24	17	15	14	12	11	9	7	7
Свыше 24 до 26	21	19	17	15	14	11	8	8
Свыше 26 до 28	26	23	21	18	16	12	9	9
Свыше 28 до 30	29	26	24	21	19	14	10	10
Свыше 30 до 33	34	31	28	26	23	17	11	11

Объем дублирующего контроля судокорпусных конструкций может быть дифференцирован в зависимости от степени нагруженности сварных соединений на стадии эксплуатации, напряжения от которых взаимодействуют с остаточными напряжениями, возникающими в процессе сварки, а также проводиться при отрицательных температурах.

Такаюки Сираива с соавторами [55] на пробах «Тэкен» показали, что содержание диффузионного водорода в большей мере сосредоточено в центре сварного шва (Рисунок. 1.10), а скорость выхода диффузионного водорода из сварного шва зависит от температуры начала сварки (Рисунок. 1.11). При комнатной температуре скорость выхода диффузионного водорода из сварного шва ниже, чем его перераспределение внутри сварного шва, поэтому на графике (Рисунок. 1.11) видно, что идет рост локальной концентрации диффузионного водорода в корне шва. В то же время повышение температуры подогрева повышает скорость выхода диффузионного водорода, что снижает его локальную концентрацию в наиболее опасной зоне корня шва. Таким образом, температура подогрева положительно влияет не только на

скорость охлаждения и структуру сварного шва, но и на скорость выхода диффузионного водорода.

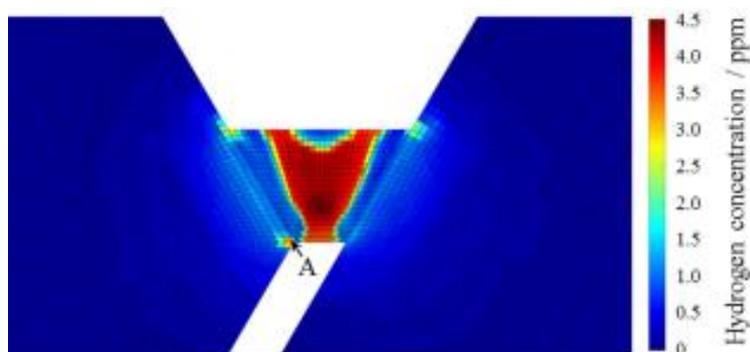


Рисунок 1.10 – Распределение концентрации диффузионного водорода через 2 ч после сварки с металлом шва LB-116 и температурой предварительного подогрева 20 °C [55]

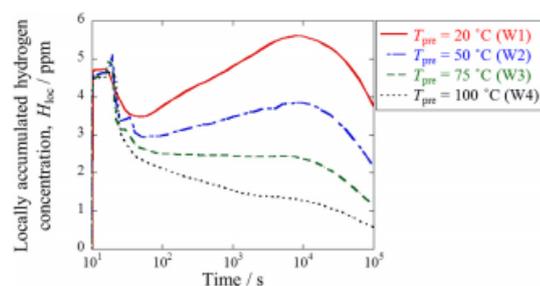


Рисунок 1.11 – Концентрация диффундирующего водорода в точке А рисунок (1.10)

Как отмечалось выше в процессе кристаллизации сварочной ванны водород в сварном соединении концентрируется в наплавленном металле (см. рис.1.10), образуя тем самым неравновесную систему. В силу действия закона Фика избыточный водород диффундирует из металла шва в зону термического влияния (см. рис.1.11), повышая тем самым риск появления холодных трещин закаливающих сталей.

Учитывая вышеизложенное, можно констатировать, что применяемые в настоящее время критерии и методы оценки сопротивляемости высокопрочных сталей образованию холодных трещин не гарантируют их отсутствия в сварных соединениях судокорпусных конструкций. На основании этого обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследований.

### 1.3 Существующая методика одобрения технологических процессов сварки

Высокопрочная судостроительная сталь классифицируется по минимальным пределам текучести: 420, 460, 500, 550, 620, 690, 890 и 960 МПа.

Согласно части, XIII «Материалы» РС (НД № 2-020101-104) [93] оценка вероятности появления холодных трещин судостроительных сталей осуществляется

расчетными методами, разработанными для углеродистых, марганцовистые и некоторых низколегированных сталей, что недостаточно для гарантированного отсутствия холодных трещин.

Согласно НД №2-030101-015 РС [94] оценка сопротивляемости образованию трещин металла шва для сварочных материалов выполняется экспериментальными методами на технологической пробе, приведенной на рисунке (1.12).

При отсутствии трещин в сварном шве пробы после визуального контроля (см. рисунок 1.12) она подлежит дальнейшим исследованиям, которые приведены ниже:

1) из пробы необходимо вырезать две заготовки для продольных и три для поперечных макрошлифов, а также одну заготовку для изготовления цилиндрических образцов для проведения испытаний на растяжение (рисунок 1.13);

2) из заготовок №1, 5 (рисунок 1.14 а) должно быть изготовлено по одному макрошлифу;

3) из заготовки №2 (см. рисунок 1.13) должны быть изготовлены:

- один вертикальный макрошлиф, расположенный в продольном направлении относительно оси сварного шва (рисунок 1.14 б)
- один горизонтальный макрошлиф, расположенный в продольном направлении относительно оси сварного шва (рисунок 1.14 в), если пластина из углеродистой стали;

4) из заготовки №4 (см. рисунок 1.13) должно быть изготовлено несколько поперечных макрошлифов (рисунок 1.14 д) с разделкой по рисунку 1.14 г, если пластина из низколегированной стали;

5) из заготовки №3 (см. рисунок 1.13) необходимо изготовить цилиндрические образцы для проведения испытаний на растяжение.

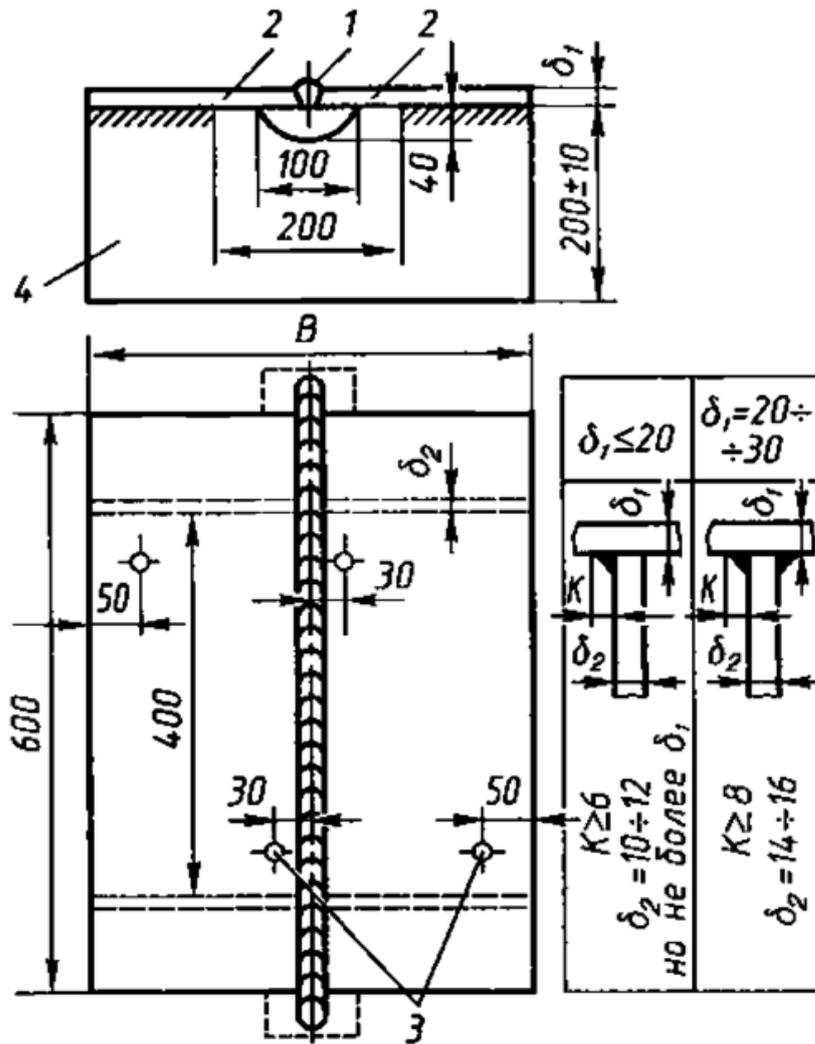


Рисунок 1.12 – Стыковая технологическая проба для определения стойкости сварного шва к появлению холодных трещин по [94]

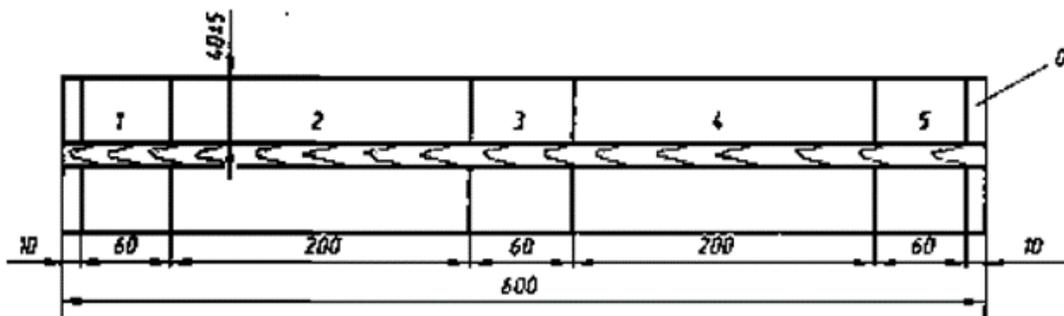


Рисунок 1.13 – Схема вырезки заготовок для макрошлифов из стыкового соединения пробы: 0 – отход; 1, 3, 5 – заготовки для поперечных макрошлифов и круглых разрывных образцов; 2, 4 – заготовки для продольных макрошлифов

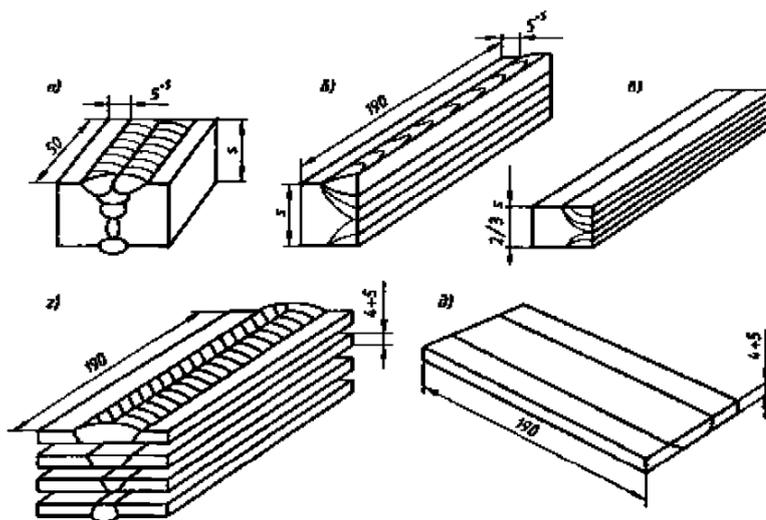


Рисунок 1.14 – Схема макрошлифов, изготавливаемых из заготовок

Применение данной пробы на практике показало, что она не в полной мере обеспечивает требуемую жесткость, характерную для реальных сварных соединений и чрезвычайно сложна в изготовлении.

К недостаткам существующих процедур одобрения технологии сварки следует отнести тот факт, что при оценке появления в сварных соединениях холодных трещин не рассматривалась нижняя граница диапазона погонных энергий сварки, заявленного к одобрению.

Из изложенного выше следует, 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 принятого в Правилах Российского морского регистра судоходства.

#### 1.4. Цель и задачи исследования

**Целью работы** является разработка методики оценки сопротивления образованию холодных трещин сварных соединений высокопрочных сталей для одобрения технологических процессов сварки судокорпусных конструкций

**Задачи исследования:**

- обоснование типа пробы и области её применения для оценки сопротивления образованию холодных трещин высокопрочных сталей;
- провести экспериментальное исследование технологической прочности сварных соединений высокопрочной стали с оценкой степени значимости погонной энергии, температуры начала сварки, группы прочности сварочных материалов на сопротивляемость образованию холодных трещин на предлагаемой пробе;
- разработать методику и провести расчётную оценку конструкционной прочности сварных соединений с «мягкими» угловыми швами для применения их в судокорпусных конструкциях
- разработать предложения по совершенствованию методики одобрения технологических процессов сварки для внесения изменений в НД № 2-020101-118 части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов ФАУ «Российский морской регистр судоходства».

## **2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ**

Одним из способов борьбы с образованием холодных трещин является предварительный подогрев, который изменяет скорость охлаждения ЗТВ и металла шва.

Востребованность данного приема обусловлена тем, что изначально температуру предварительного подогрева определяли по результатам испытаний проб «Тэккен», что повышало ее обоснованность и эффективность в части предотвращения образования ХТ для классических высокопрочных сталей периода 60–70-х годов прошлого столетия. Впоследствии для исследуемых марок сталей были получены соответствующие уравнения регрессии, позволяющие определить температуру предварительного подогрева расчетным путем.

Принимая предварительный подогрев как способ повышения сопротивления образованию ХТ, следует отметить, что он не является единственным и наиболее эффективным, особенно в отношении конструкций из современных высокопрочных сталей, свариваемых в условиях низких температур. В частности, управлять скоростью охлаждения сварного шва возможно погонной энергией, а изменить – снизить уровень остаточных напряжений в зоне предразрушения – варьированием предела текучести наплавленного металла.

В данном разделе необходимо выбрать наиболее эффективную пробу для оценки появления холодных трещин, для чего требуется разработать критерии выбора проб. Затем необходимо провести компьютерное моделирование выбранной пробы для оценки её применимости для стыковых и угловых швов, после чего выполнить натурные эксперименты.

### **2.1. Выбор проб для оценки сопротивления образованию холодных трещин**

В мировой практике исследования свариваемости конструкционных сталей известно большое количество проб для оценки их склонности к образованию ХТ. Предлагаемые пробы отличаются по конструктивной форме, степени жесткости,

способу создания остаточных растягивающих напряжений и области их применения. Большинство предлагаемых проб, как и методов расчетной оценки сопротивления ХТ, о которых говорилось выше, были разработаны и апробированы на классических высокопрочных сталях, которые отличаются от рассматриваемых в настоящей работе. Для принятия решения в отношении выбора пробы для оценки сопротивления появлению ХТ рассматриваемых марок стали, необходимо провести сравнительную оценку их эффективности, провести численные и экспериментальные исследования, обосновывающие правомерность ее применения.

Для выбора конструкции пробы из широко известных [31, 40] (см. таблицу 2.1) следует определить критерии:

1. Так как появление холодных трещин связано с растягивающими напряжениями, то следует отдать предпочтение пробам, которые имеют в корне шва такие напряжения.

2. Указанные напряжения должны быть направлены по нескольким осям, что будет являться наиболее жестким вариантом и позволит учесть влияние большего количества неблагоприятных факторов.

3. Проба должна обеспечивать место зарождения трещины как в ЗТВ, так и в металле шва.

4. Проба должна быть широко известной международному и российскому профессиональному сообществу. Результаты натурных испытаний таких проб должны быть отражены в научных публикациях ведущих журналов мира.

5. Оптимально было бы, чтобы для получения однозначного результата требовалось минимальное количество проб.

Первый, третий и четвертый критерии являются условием первоначального отбора проб, а второй и пятый критерии будут являться условием окончательного выбора.

Необходимо отметить, что помимо указанных критериев будем принимать во внимание трудоемкость механической подготовки заготовок [102] для проб и их последующих испытаний.

Таблица 2.1 – Перечень проб для оценки склонности сварных соединений к возникновению ХТ

№ п/п	Наименование теста	Область применения			Место локализации трещины	НТД
		Приемочные испытания	Исследование свариваемости	Моделирование особых условий		
1	Implant-Test	+	+	–	ЗТВ	[74, 23, 77, 10, 58]
2	LTP-Test	+	+	+	ЗТВ	–
3	TRC-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
4	Bead Bend Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
5	Tekken-Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[78, 74, 10, 58, 37, 15]
6	U-Groove Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[78, 23, 36]
7	Lehigh-Test	–	+	–	МШ	[10]
8	CTS-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	[78, 15]
9	Cruciform-Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[74, 10, 58]
10	WIC -Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
11	IRC-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
12	RGW-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	[78, 58]
13	GBOP-Test	+	+	–	МШ	–

Учитывая вышеизложенное, проведем процедуру прореживания ряда альтернатив (см. таблицу 2.1) по критериям 1, 3, 4. Из таблицы 2.1 следует, что данным критериям удовлетворяют пробы № 5, № 6, № 8, № 9, № 12, большая часть которых относится к пробам с естественной жесткостью. Здесь следует отметить, что испытания с естественной жесткостью (пробы № 5, № 6, № 8, № 9), по сравнению с испытаниями с приложением внешней нагрузки (проба № 12), более адекватно оценивают процесс зарождения ХТ как технологического дефекта сварного соедине-

ния. Вместе с тем, испытания с приложением внешней нагрузки позволяют сравнить между собой пробы без трещин и проранжировать тем самым основные и сварочные материалы с позиции их реакции на эксплуатационные воздействия.

После прореживания ряда альтернатив по критериям 1, 3, 4 перейдем к ранжированию оставшихся проб по критериям 2 и 5. Согласно [58, 74] RGW-Test (проба №12, рисунок 2.1) проводят на полноразмерных сварных соединениях с V-образной разделкой кромок, которые выполняют с полным проплавлением за один или несколько проходов в зависимости от толщины соединяемых деталей. С позиции критерия 2 данный тип соединения обладает наименьшей, из рассматриваемых альтернатив, концентрацией напряжений в корне шва, которая определяется геометрией обратной стороны валика корневого прохода. Если рассмотреть вариант пробы RGW с многопроходной сваркой, то корневой валик в ней подвергается многократному нагреву, который снижает концентрацию диффузионного водорода в зоне максимальных растягивающих напряжений [39, 53]. Хотя данный тест разработан давно (более 30 лет назад), он не включен в современные международные и российские нормативные документы по оценке появления ХТ, что не позволяет рассматривать его в качестве основного варианта.

Далее, соответственно, сравним между собой пробы № 8, 9 (рисунки 2.2, 2.3) и № 5, 6 (рисунки 2.4, 2.5).

Известно [40], что проба Cruciform-Test (проба №9) считается развитием пробы CTS (проба №8) и является более жесткой. Однако, её практическое применение [40] выявило меньшую повторяемость результатов по сравнению в пробой CTS. Видимо этим объясняется, тот факт, что крестообразная проба Cruciform-Test (проба №9) не была включена в нормативные документы, в то же время проба CTS включена в иностранный документ [15]. Исходя из этого, крестообразную пробу №9 исключаем.

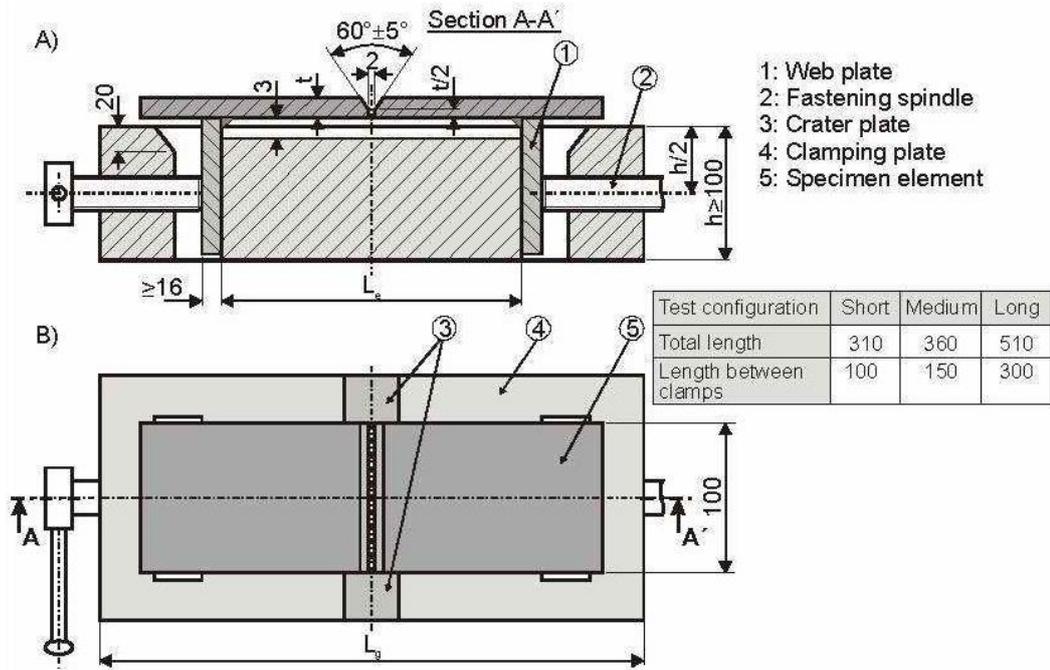


Рисунок 2.1 – Схема испытания RGW-test [58]

а) вид спереди; б) вид сверху

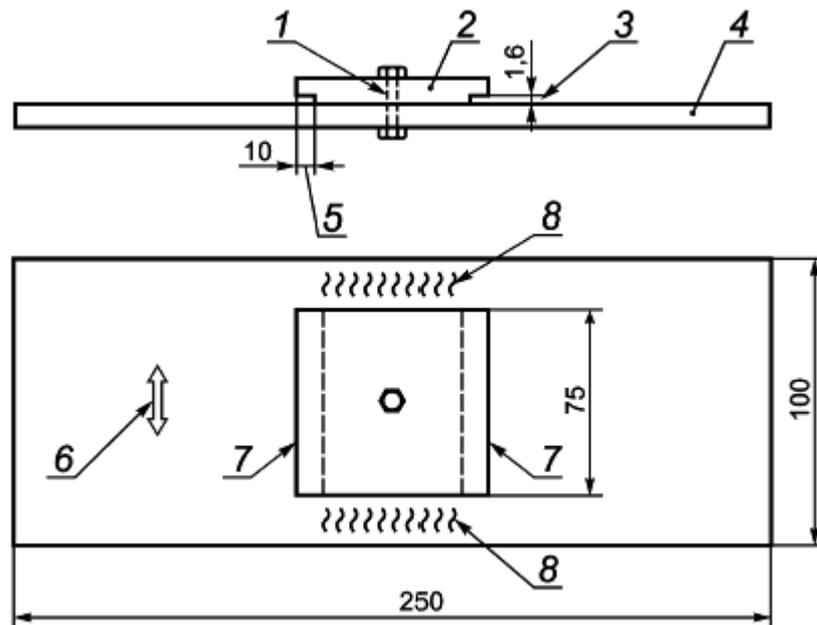


Рисунок 2.2 – Схема испытания CTS-Test [78]

1 - отверстие диаметром 13 мм; 2 - верхняя плита; 3 - зазор в корневом вырезе; 4 - нижняя плита; 5 - глубина корневого выреза; 6 - предпочтительное направление прокатки; 7 - испытываемые швы; 8 - крепежные швы

CTS-Test (рисунок 2.2) используется для оценки качества основного металла и выбора оптимальных параметров процесса сварки. Для этого по двум сторонам

пластины №2 выполняют вспомогательный угловой шов №8. После остывания образца и подтягивания болта №1 выполняют сварку опытного сварного шва №8 по одной или двум сторонам пластины №1. В ходе этого испытания образуются трещины в зоне термического влияния или в металле сварного шва.

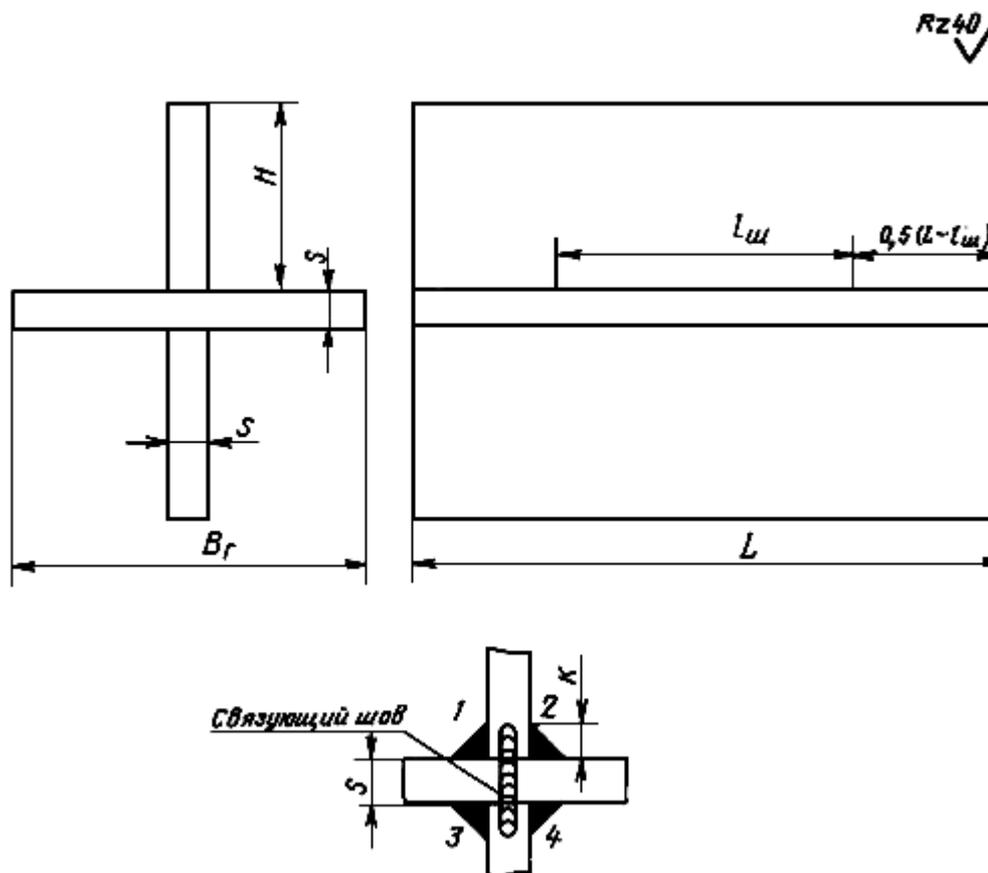


Рисунок 2.3 – Схема испытания крестообразной пробы Cruciform-Test [10]

а) вид спереди; б) вид сверху; в) вид сбоку

Крестовая проба Cruciform-Test состоит из трех пластин, которые собираются с помощью связующих швов. Для обеспечения проектного положения соединяемых деталей все контактные поверхности пробы шлифуются перед сборкой. В общем случае на пробе выполняют четыре угловых шва, местоположения и размеры (см. рис. 2.3). По истечении сорока восьми часов после окончания сварочных работ крестовую пробу подвергают высокотемпературному отпуску при температуре от шестиста до шестьсот пятидесяти градусов цельсия в течении двух часов. Затем ее разрезают на поперечные микрошлифов для выявления трещин в околошовной

зоне. Если на двух первых макрошлифах не выявляют трещин, то результаты испытаний считаются удовлетворительными.

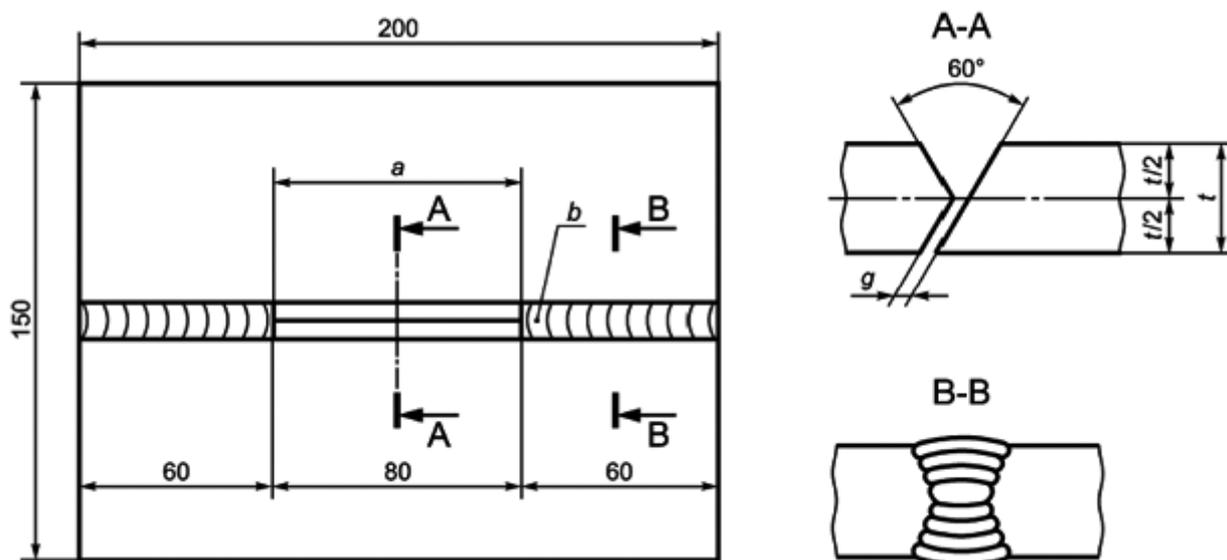


Рисунок 2.4 – Схема испытания Tekken-Test [15]

*a* - зона испытания; *b* - крепежный шов; *t* - толщина испытуемой плиты; *g* - зазор в корне шва, равный  $(2,0 \pm 0,2)$  мм

На схеме испытаний пробы Теккен изображенной на рисунке 2.4 крепежный сварочный шов обозначенный латинской буквой *b* выполняется в «X» образную разделку. Для обеспечения соосности стыкуемых пластин и отсутствия дефекта под названием «перелом осей стыкуемых деталей», выполнение сварных швов необходимо осуществлять поочередно с разных сторон. После наложения трех, четырех сварочных валиков дальнейшая очередность не имеет значения. Также при сборке пробы необходимо учесть стягивание деталей при выполнении крепежных швов и изменение зазора между стыкуемыми деталями. Из практического опыта можно рекомендовать устанавливать зазор между стыкуемыми деталями около 2,8 мм для обеспечения нормативного значения после выполнения крепежных швов в интервале 1,8-2,2 мм регламентируемых стандартом. В средней части пробы обозначенной размером *a* разделка совмещенная, на одной детали она соответствует половине X-образной, а на другой половине V-образной.

Проба «Тэккен» представляет собой плоскую пробу с V-образной разделкой длиной 80 мм (рисунок 2.4) и служит для оценки свариваемости стали. Для обеспечения конструктивной жесткости образца предварительно свариваются крепежные шва. Затем сваривается испытуемый шов длиной 80 мм и выдерживается после сварки в течении 48 часов.

Обязательное условие пробы «Тэккен» является наличие в корне шва конструктивного непровара, который служит концентратором напряжений. Для оценки результатов пользуются различные количественные показатели, характеризующие отношение суммарной длины или высоты образовавшейся трещины к длине или высоте испытуемого сварного шва соответственно.

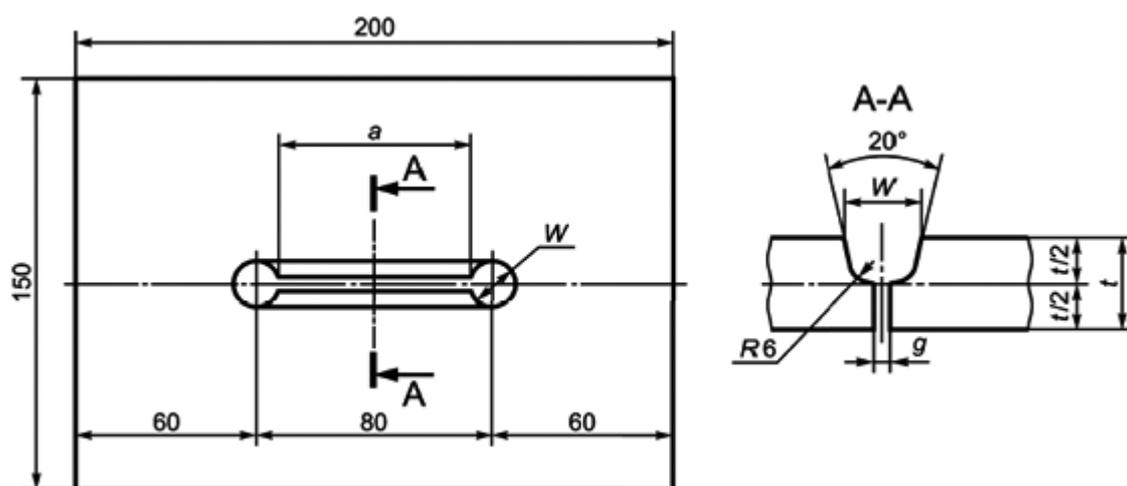


Рисунок 2.5 – Схема испытания U-Groove Test [15, 36]

$a$  - зона испытания;  $W$  - диаметр отверстия (зависит от толщины плиты) и ширина разделки;  $t$  - толщина испытуемой плиты;  $g$  - зазор в корне шва, равный  $(2,0 \pm 0,2)$  мм

Проведем сравнение проб №5 и №6. Они достаточно известны и включены в нормативные документы [78]. Они предполагают применение одинакового количества испытаний и с позиции критерия 5 их можно признать равнозначными. Данные пробы различаются по критерию 2 – по уровню напряженного состояния в корне сварного шва. Это подтверждает работа [54], где показано распределение интенсивности напряжений по длине сварного шва (рисунок 2.6), из которого более

жеской является проба «Тэккен». Необходимо отметить, что уровень напряжений на краях (в начале и конце) шва различается до 2-х крат.

Далее необходимо сравнить оставшуюся пробу «Тэккен» с пробой №8 (CTS-test). По данным [51, 96] исходя из практики применения указанных проб, проба «Тэккен» имеет большую жесткость напряженного состояния. Из реального опыта сварки установлено, что проба CTS не выявила склонности к образованию ХТ угловых сварных швов, выполненных проволокой DSII91LT на стали PCE500. При этом в реальных сварных швах блоков секций корпуса судна были обнаружены многочисленные ХТ. К недостатку CTS-Test пробы следует отнести высокую трудоёмкость испытаний, которая связана с поочередным охлаждением каждого испытываемого сварного шва в воде и поочередной выдержкой каждого шва в периоде двух суток при температуре двадцать градусов цельсия.

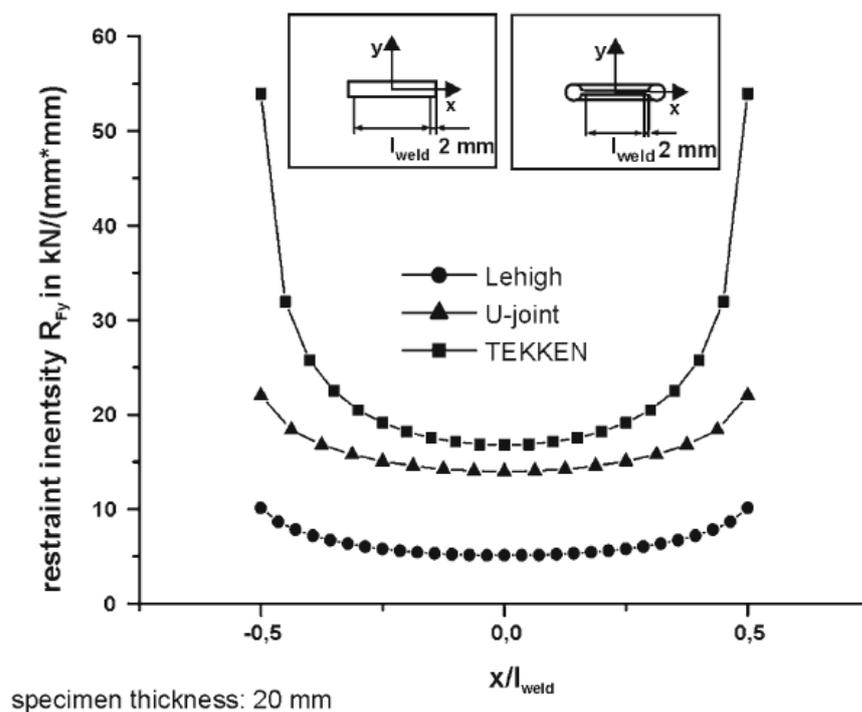


Рисунок 2.6 – Интенсивность остаточных напряжений на пробах «Тэккен» и Lehigh и U-joint [54]

Следует отметить, что методы имитационного моделирования термического цикла сварки максимально информативны и универсальны. Однако их применение связано с использованием дорогостоящего специализированного оборудования и

высококвалифицированных специалистов, которыми располагаю в основном крупные научно-исследовательские организации.

Таким образом, анализируя пробы по разработанным критериям наиболее известной, простой, имеющей высокую жесткость напряженного состояния в корне шва является проба «Тэккен» [60]. Данная проба известна мировому сообществу и, потенциально, может быть внедрена не только в Российский регистр, но и в иностранные регистры.

## **2.2 Компьютерное моделирование термомеханических процессов в программном комплексе ESI SYSWELD для обоснования области одобрения пробы «Тэккен»**

Для оценки возможности применения пробы «Тэккен» для корневых валиков угловых швов проведем компьютерное моделирование в программном комплексе ESI SYSWELD. Для моделирования выберем одинаковые толщины стенок и режимы сварки (погонная энергия и скорость сварки), а также площадь сечения сварного шва. Примем следующие параметры моделирования: толщина стенки 25,8 мм, погонная энергия 10 кДж/см, скорость сварки 3 мм/с, площадь сечения сварного шва около 12,5 мм<sup>2</sup>, катет углового шва 5 мм, основной и присадочный материал соответствуют стали PCE500TM. Данные режимы являются типовыми и широко применяются для механизированной сварки в смеси газов.

Для моделирования термических циклов в ESI SYSWELD построена конечно-элементная сетка пробы «Тэккен» в соответствии с геометрией, представленной на рисунке 2.7, а также тавровое соединение с двумя швами (рисунок 2.8). Для обеспечения идентичных условий формирования сварного шва в тавровом соединении был смоделирован зазор 2 мм, который повторяет требование к зазору пробы «Тэккен».

Особенностью моделирования сварки таврового соединения с двумя швами является то, что при наложении первого валика второго еще не существует. То есть, все напряжения и деформации будут соответствовать сварке только одного валика. После наложения первого валика заложено полное остывание до температуры

20 °С. Второй валик смоделирован для возможности сравнения уровня остаточных напряжений и деформаций, для выбора наиболее опасного варианта сварки.

Закрепление пробы «Тэккен» не производилось, а при сварке таврового соединения была закреплена полка (центральная часть нижней пластины).

Результаты моделирования приведены на рисунках 2.9 – 2.21 и в таблице 2.2. На рисунках 2.9, 2.12, 2.13 приведены температурные поля пробы «Тэккен» и таврового сварного соединения, соответственно. На рисунках 2.10, 2.11 показано напряженно-деформированное состояние сварного соединения пробы «Тэккен». Хорошо видно, что концентрация напряжений сосредоточена в центре сварного шва пробы «Тэккен». На рисунках 2.14–2.21 приведены поля напряжений в угловом шве таврового соединения на различных этапах сварки, которые показали рост напряжений в первом шве при выполнении сварки второго шва. Максимальные напряжения сосредоточены во втором шве после его полного остывания. Однако они не превышают напряжений в пробе «Тэккен» (см. таблицу 2.2).

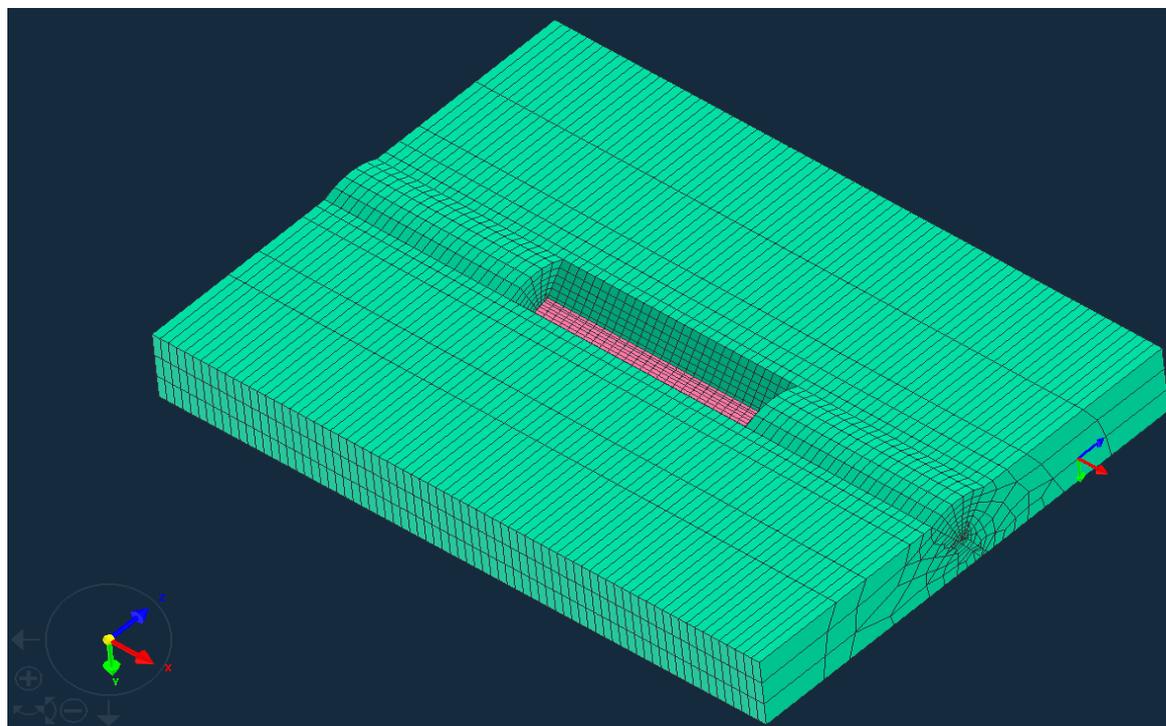


Рисунок 2.7 – Конечно-элементная сетка пробы «Тэккен»

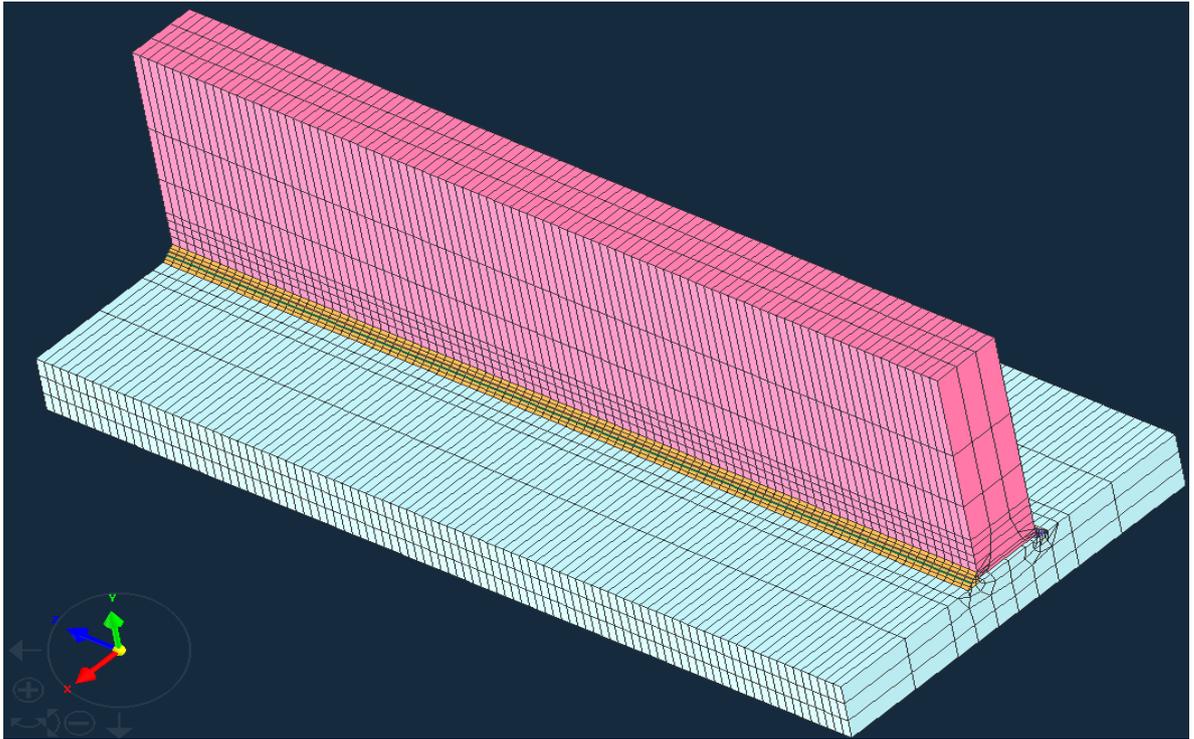


Рисунок 2.8 – Конечно-элементная сетка таврового соединения

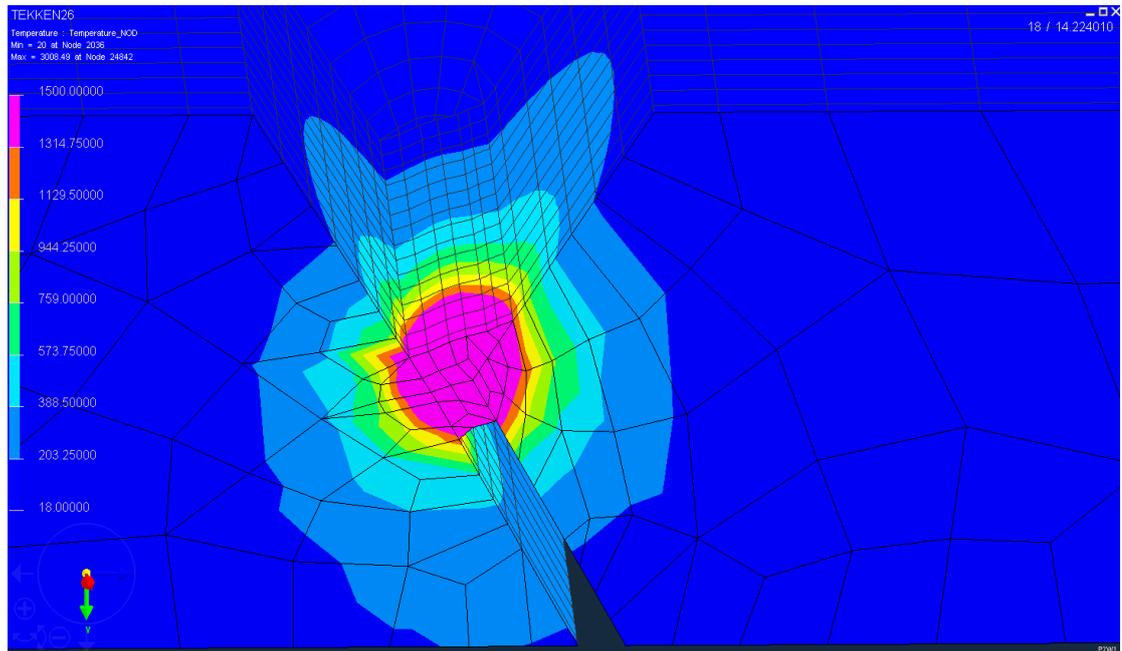


Рисунок 2.9 – Температурное поле пробы «Тэккен»

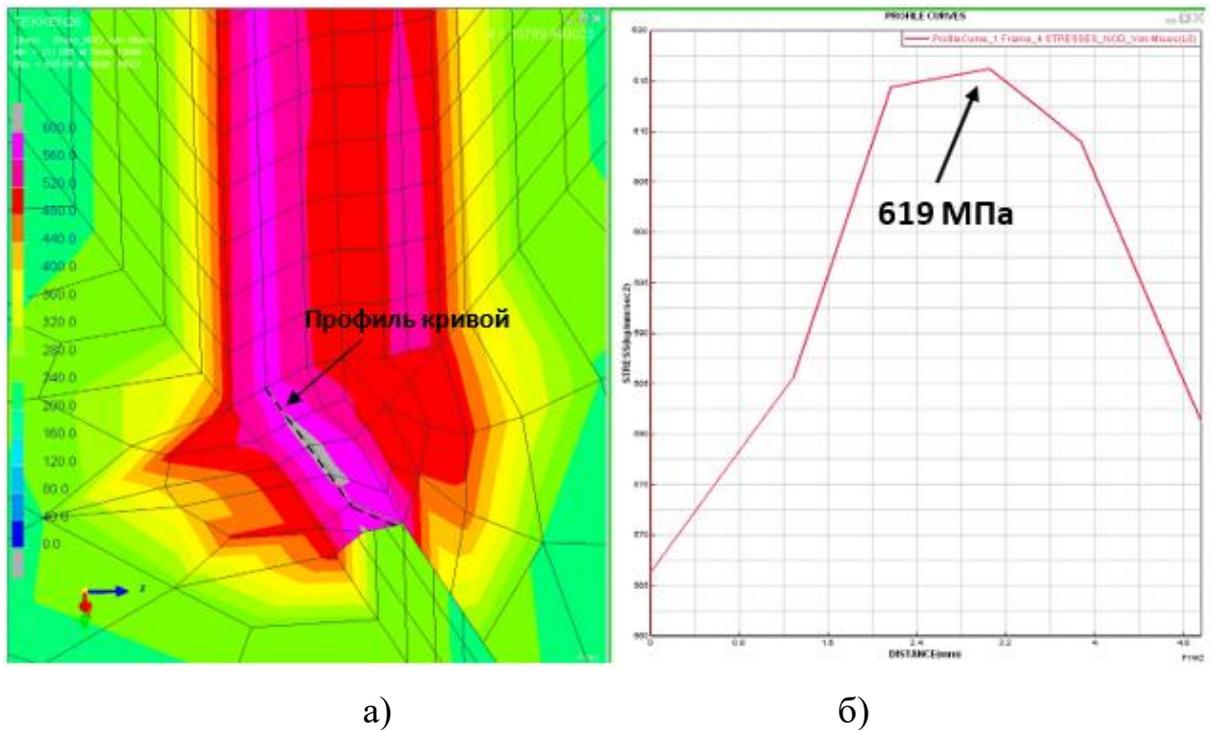


Рисунок 2.10 – Поле эквивалентных напряжений по Мизесу пробы «Тэккен»: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

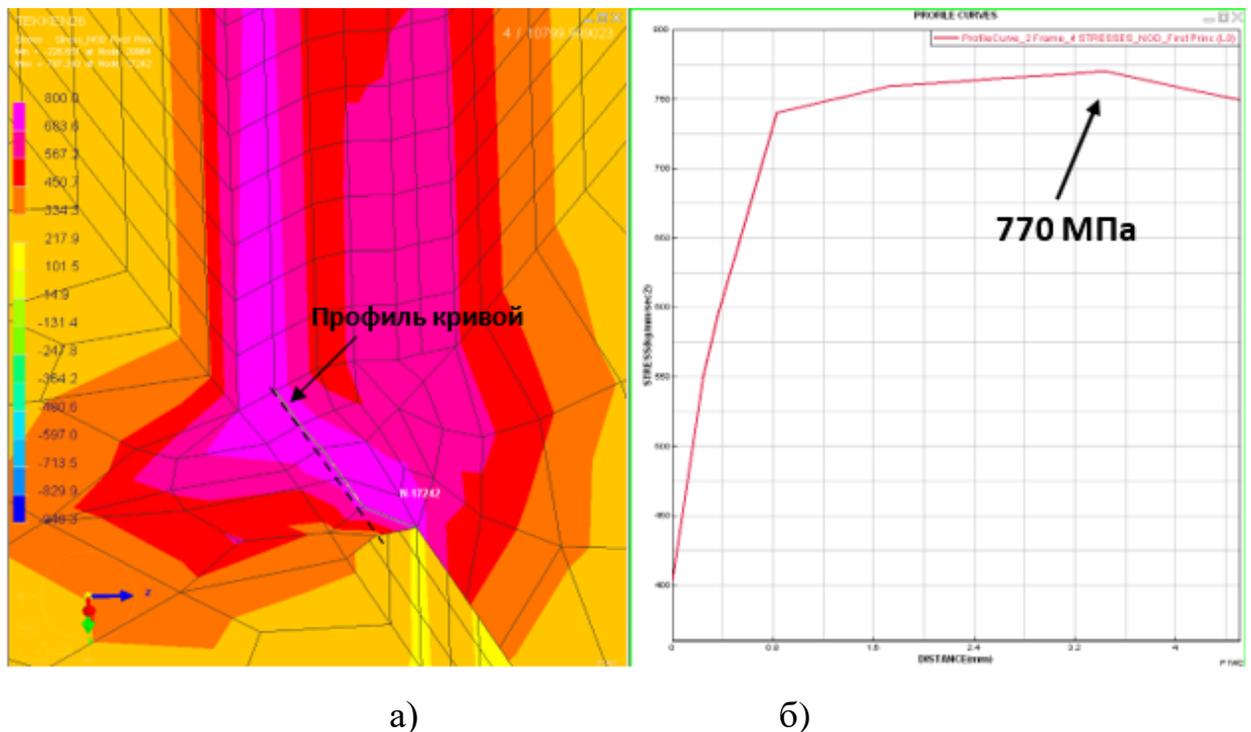


Рисунок 2.11 – Поле распределения первых главных напряжений пробы «Тэккен»: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

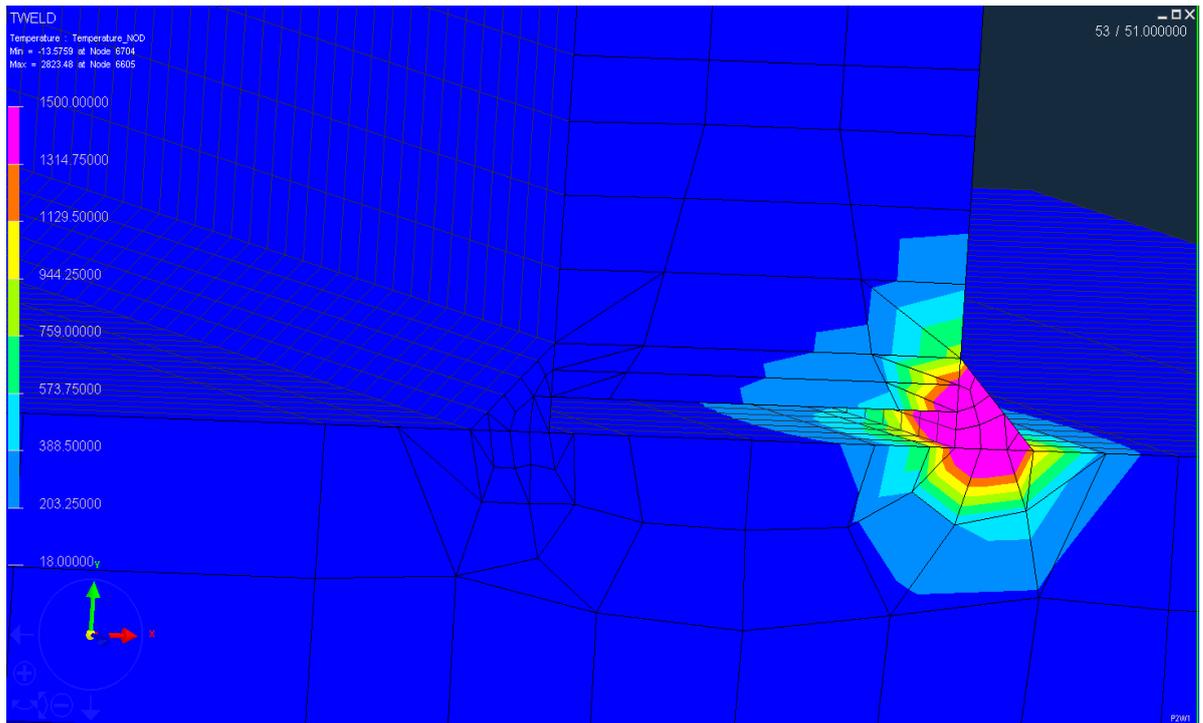


Рисунок 2.12 – Температурное поле 1-го шва таврового соединения

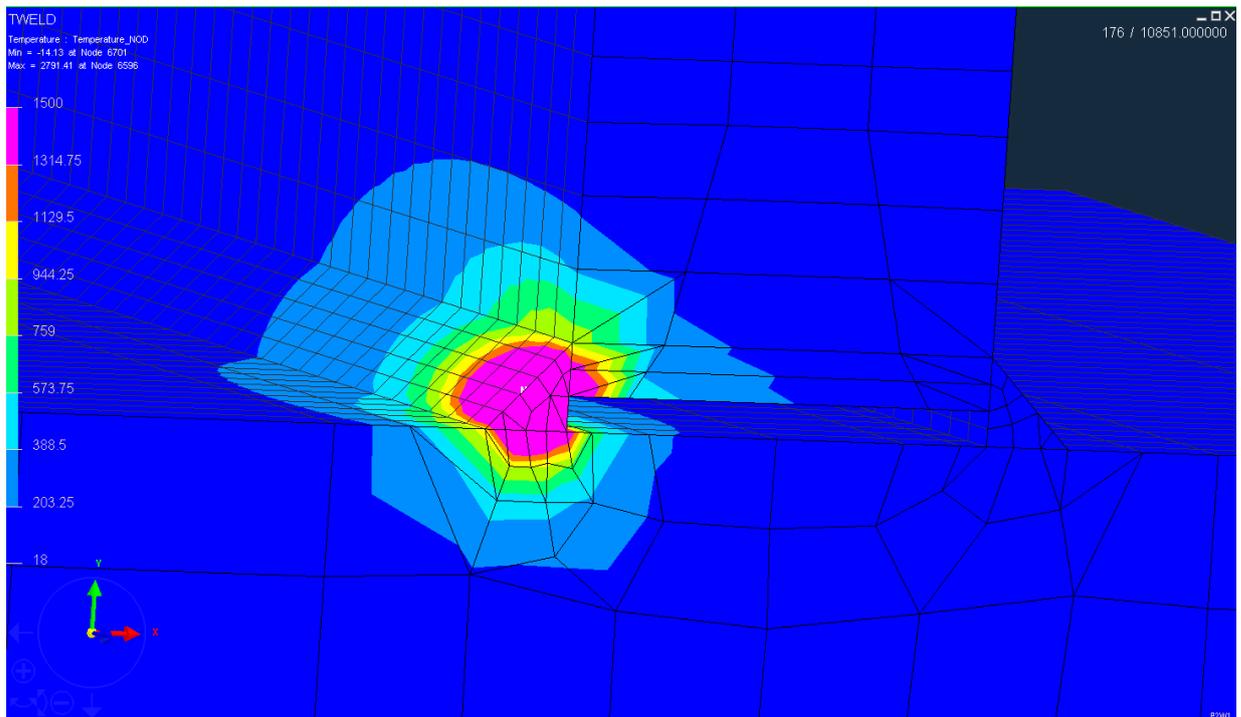


Рисунок 2.13 – Температурное поле 2-го шва таврового соединения

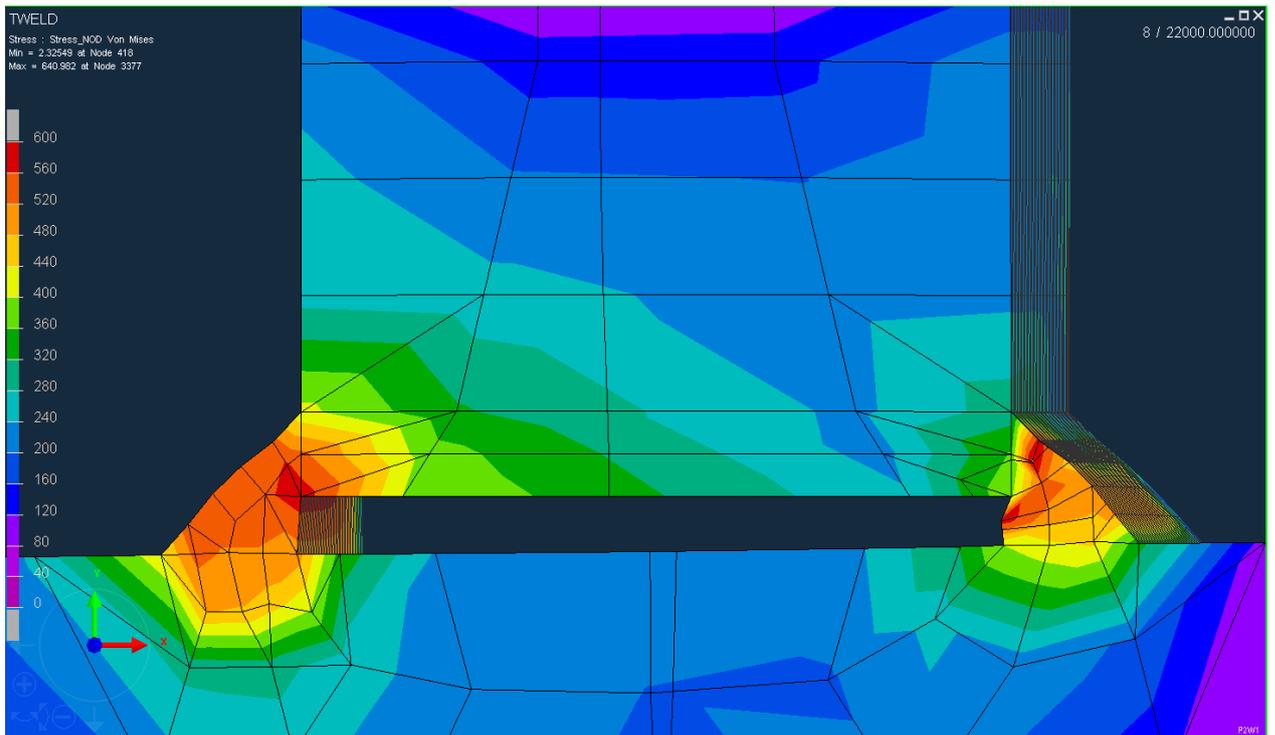
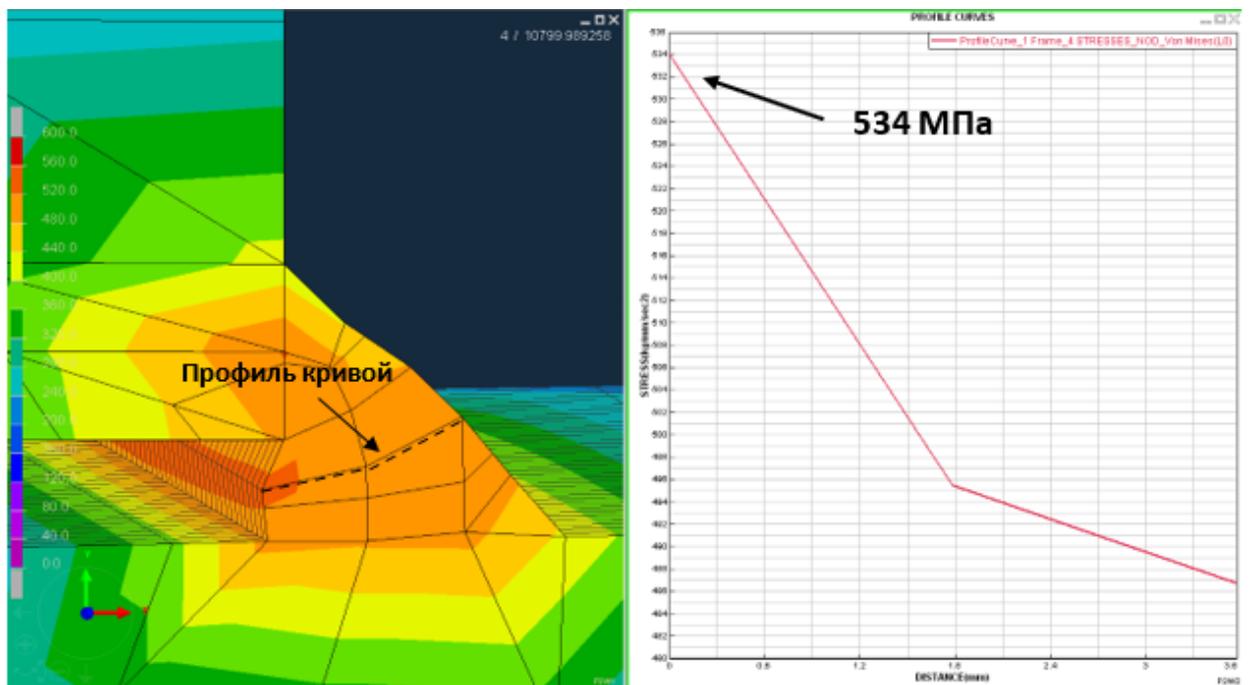


Рисунок 2.14 – Поле эквивалентных напряжений по Мизесу таврового соединения после выполнения сварки всех швов и полного остывания



а)

б)

Рисунок 2.15 – Поле эквивалентных напряжений в 1-ом шве по Мизесу таврового соединения после выполнения сварки 1-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

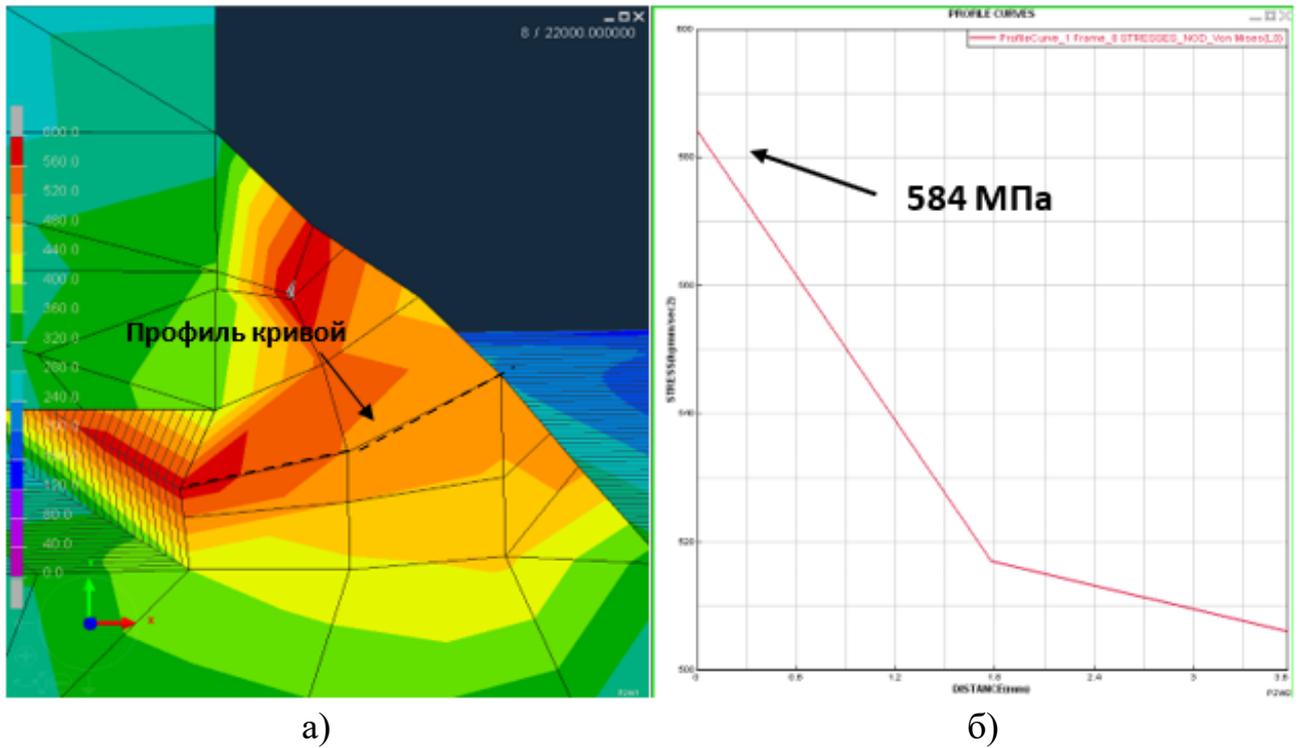


Рисунок 2.16 – Поле эквивалентных напряжений в 1-ом шве по Мизесу таврового соединения после выполнения сварки 2-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

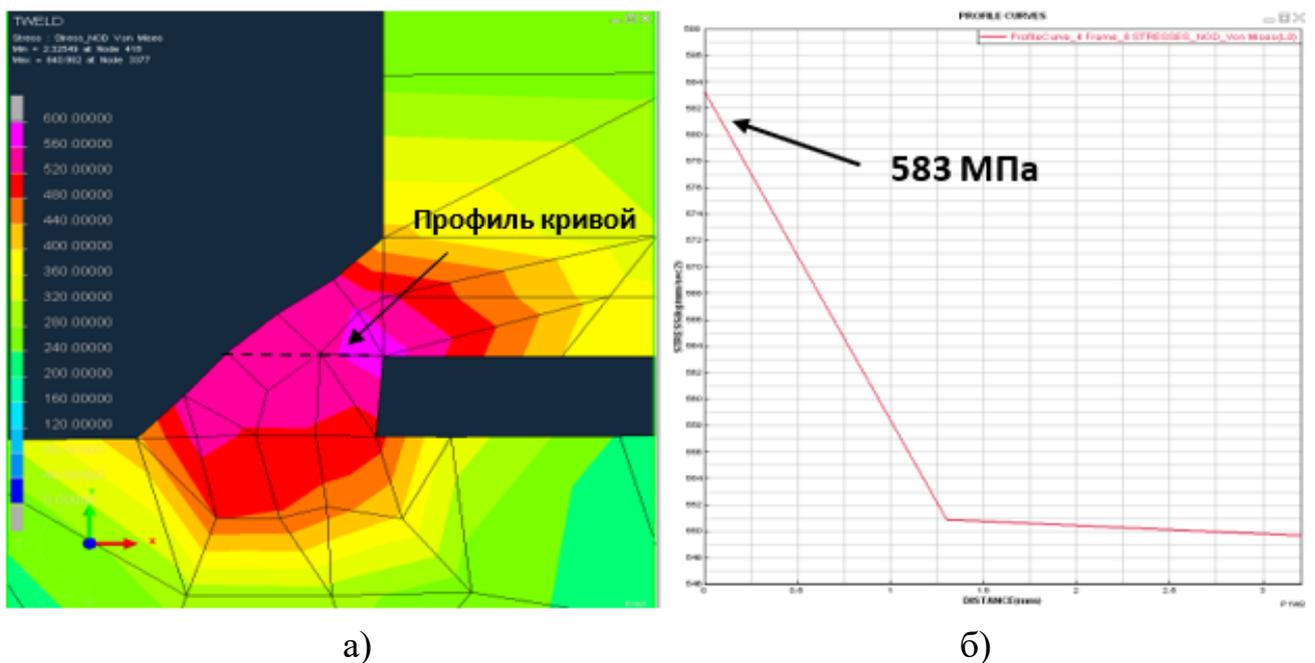


Рисунок 2.17 – Поле эквивалентных напряжений во 2-м шве по Мизесу таврового соединения после выполнения сварки 2-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

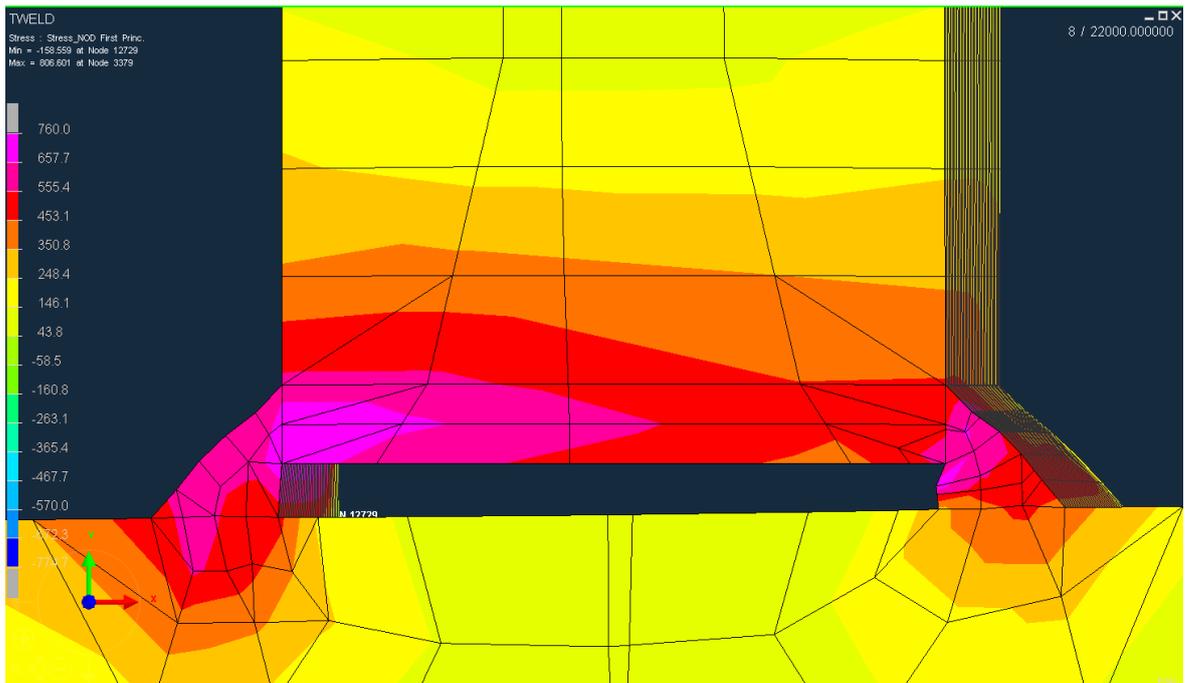
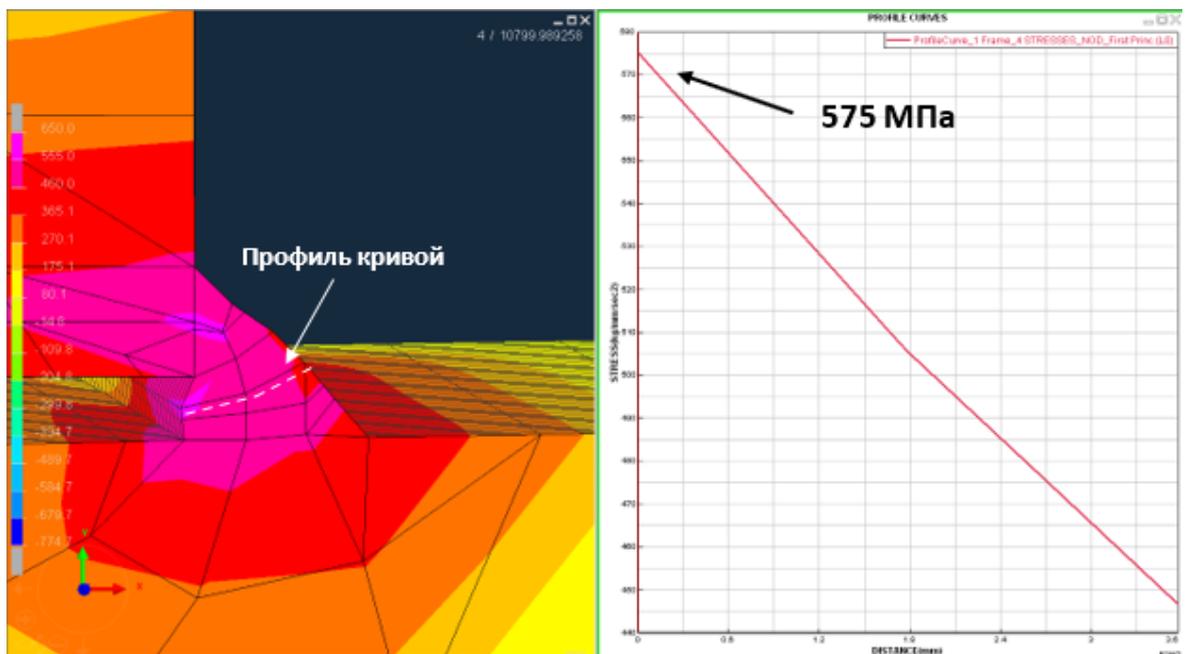


Рисунок 2.18 – Поле первых главных напряжений таврового соединения после выполнения сварки всех швов и полного остывания



а)

б)

Рисунок 2.19 – Поле первых главных напряжений в 1-м шве таврового соединения после выполнения сварки 1-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

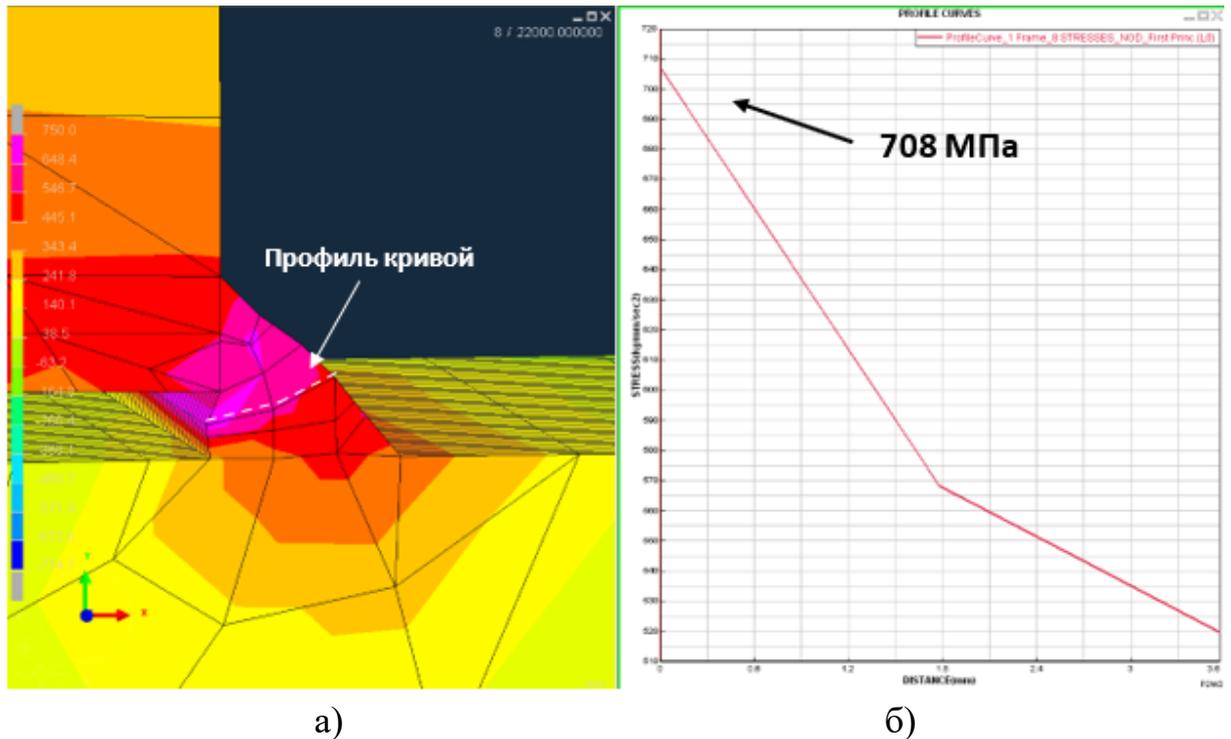


Рисунок 2.20 – Поле первых главных напряжений в 1-м шве таврового соединения после выполнения сварки 2-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

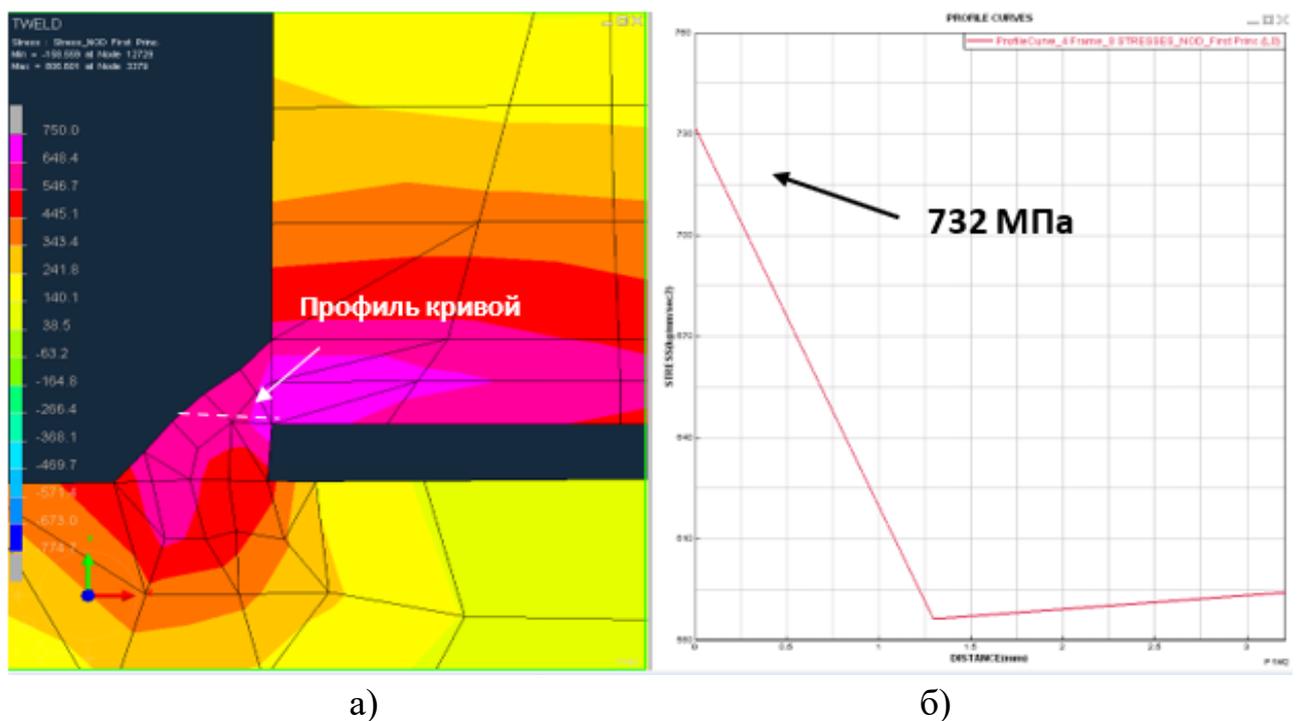


Рисунок 2.21 – Поле первых главных напряжений в 2-м шве таврового соединения после выполнения сварки 2-го шва: а) и б) – кривая распределения напряжений по сечению шва, начиная от его корня

Таблица 2.2 – Максимальные остаточные сварочные напряжения, полученные по результатам численного моделирования

№ п/п	Наименование параметра	Проба «Тэккен»	Тавровое соединение		
			после наложения 1-го шва	после наложения 2-го шва	
			в 1-м шве		во 2-м шве
1	Напряжения по Мизесу, МПа	619	534	584	583
2	Первые главные напряжения, МПа	770	575	708	732

Таким образом, уровень напряжений в пробе «Тэккен» превышает уровень напряжений при сварке корня угловых швов таврового соединения, что позволяет распространить область одобрения пробы «Тэккен» как на стыковые, так и на угловые швы.

### **2.3. Обеспечение сопротивления образованию холодных трещин за счет изменения погонной энергии**

В настоящем разделе исследовано влияние величины эффективной погонной энергии на сопротивляемость возникновения холодных трещин в высокопрочной стали РСЕ500ТМ (10Г2ФБЮ), характеристики которой приведены в таблице 2.3 и таблице 2.4.

В соответствии с НД № 2-020101-104 [93] в качестве основного критерия классификации стали по категориям прочности в РС принят минимальный предел текучести металла. Исследуемые в настоящей работе партии стали 10Г2ФБЮ (по сертификату) являются аналогами РСЕ500ТМ, так как их химический состав, механические свойства и технология производства соответствуют требованиям НД № 2-020101-104[93], предъявляемым к стали категории РСЕ500ТМ.

Таблица 2.3 – Химический состав исследуемой стали

Толщина	Массовая доля химических элементов в пробе, %											
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	S	P
18	0,09	1,59	0,32	0,09	0,007	0,05	0,09	0,06	0,05	0,034	0,002	0,012
36	0,05	1,47	0,149	0,039	0,182	0,25	0,082	0,0081	0,05	0,031	0,0012	0,01
PCE500TM	не более 0,14	от 1,0 до 1,70	не более 0,6	не более 0,5	не более 0,5	не более 2	не более 0,55	не более 0,12	не более 0,05	не более 0,02	не более 0,01	не более 0,02

Таблица 2.4 – Механические характеристики стали

Марка	Толщина проката, мм	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость		
					KCU <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-40</sup> , Дж
10Г2ФБЮ <sup>1</sup>	18	640	540	24,5	262	257	–
10Г2ФБЮ <sup>1</sup>	36	610	510	22	417	413	–
PCE500 TM <sup>2</sup>	не более 50	590–770	не менее 500	от 17/19	–	–	не менее 33/50

<sup>1</sup>По сертификату; <sup>2</sup>По НД № 2-020101-104 [93].

Испытания на сопротивление возникновению ХТ проводили в соответствии с [78] на технологических пробах «Тэккен» (рис. 2.7) при температурах воздуха минус двадцать и плюс двадцать градусов Цельсия (рис. 2.7). Эффективную погонную энергию сварки  $Q$  рассчитывали по формуле (1) и варьировали в интервале от 5,8 до 14,9 кДж/см:

$$Q = \frac{I_{св} \cdot U \cdot 60}{V_{св}} \eta, \quad (2.1)$$

где  $I_{св}$  – сварочный ток, А;  $U$  – напряжение, В;  $V_{св}$  – скорость сварки, см/мин,  $\eta$  – коэффициент полезного действия для ручной дуговой сварки, принятый равным 0,8 согласно [19]. Для сварки образцов использовались электроды ESAB МТГ-01К (Y42) с основным типом покрытия диаметром 3 мм с содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле ( $H_{диф}$ ) не более 10мл/100г [24] (таблица 2.5, 2.6).

Таблица 2.5 – Химический состав электрода ESAB MTT-01K

Марка Electroда	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo	Nb
ESAB MTT-01K	0,06	0,42	1,26	0,014	0,012	0,09	0,05	0,17	0,01	0,027	0,01

Таблица 2.6 – Механические свойства электрода ESAB MTT-01K

Марка Electroда	Группа прочности	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> (-40 °C)
ESAB MTT-01K	Y42	615	542	26	122,2 (-40 °C)

В качестве источника питания применялся многопостовой сварочный выпрямитель типа ВДМ-6303 С. Сварка проб выполнялась на постоянном токе обратной полярности по режимам, приведенным в таблице 2.7.

После сварки, по истечении 48 ч., проводили контроль образцов на наличие трещин в корневом валике визуальным и измерительным методами. Вначале каждый сварной шов контролировался на наличие поверхностных трещин. Затем, на отдельных темплетях, вырезанных из сварного шва, исследовалось его поперечное сечение с целью выявления холодных трещин (ХТ), не вышедших на поверхность металла шва.

Таблица 2.7 – Параметры режима сварки проб «Тэккен»

Маркировка образца	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/мин	Среднее значение эффективной погонной энергии, кДж/см
3, 5, 2-1, 5-1	90–100	21–22	18	5,8
1, 4, 1-1, 4-1			10	10,4
2, 6, 3-1, 6-1			7	14,9

За положительный результат испытаний принимался факт отсутствия на макрошлифе сварного соединения трещины длиной более 0,5 мм. Дополнительно, для оценки степени поврежденности сварного шва ХТ, были рассчитаны коэффициенты растрескивания [12]:

$$C_f = \frac{\sum l_f}{L} 100; \quad (2.2)$$

$$C_s = \frac{H_c}{H} 100, \quad (2.3)$$

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.

По результатам визуального и измерительного контроля (ВИК) наружной поверхности корневого валика было установлено, что образцы № 4, № 5, № 2-1 следует считать давшими неудовлетворительные результаты, так как на поверхности испытуемых сварных швов имеются трещины длиной более 0,5 мм (рисунок 2.22 а, б). Коэффициент растрескивания для них составляет: 32% для образца № 4, 60% для образца № 5 и 63% для образца № 2-1.

По результатам ВИК темплетов, вырезанных из испытуемых сварных швов, было установлено (рисунок 2.23), что в образцах № 3, № 1-1, № 5-1 имеются трещины, не вышедшие на наружную поверхность корневого валика. Причем в образце № 3 и № 5-1 трещины были только в одном из четырех темплетов с коэффициентом растрескивания 19 % и 32 % соответственно; в образце № 1-1 – в двух, с максимальным коэффициентом растрескивания 62 %.

После проведения ВИК были выполнены металлографические и дюрOMETрические исследования на поперечных шлифах сварных соединений [14]. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Axio Observer D1.m, оснащенный программно-аппаратным комплексом для анализа изображений Thixomet Pro, дюрOMETрические – на твердомере ТВ-5214 А. Травление шлифов осуществлялось 4-процентным раствором HNO в C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH.

Для анализа реакции металла на термический цикл сварки рассчитывали скорость его охлаждения ( $V_{8/5}$ ) в диапазоне температур восемьсот – пятьсот градусов Цельсия по формулам, рекомендуемым в [12]:

$$V_{8/5} = \frac{300}{t_{8/5}}, \quad (2.4)$$

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \times Q \times \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3. \quad (2.5)$$

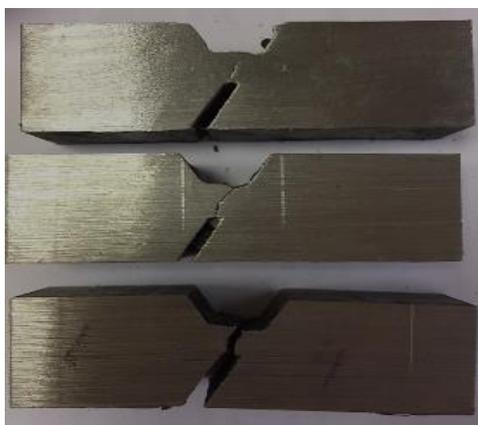
Здесь  $T_0$  – начальная температура сварки, °С;  $Q$  – эффективная погонная энергия с учетом КПД процесса нагрева изделия дугой, кДж/мм;  $F_3$  – коэффициент формы теплового потока, принятый равным 1 [12].



а)



б)

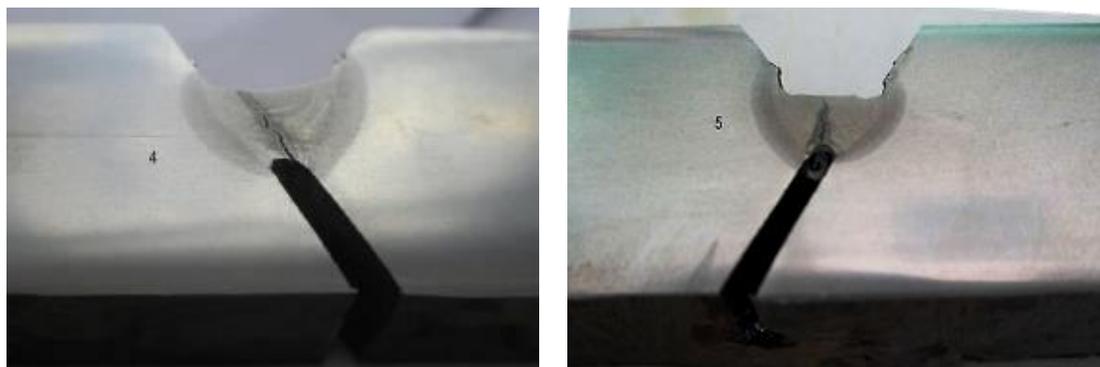


в)



г)

Рисунок 2.22 – Трещины, вышедшие на наружную поверхность корневого валика в пробе «Тэккен»: а, в – образец № 4; б, г – образец № 5



а)

б)

Рисунок 2.23 – Трещины, не вышедшие на наружную поверхность корневого валика в пробе «Тэккен»: а – образец № 4; б – образец № 5

Из полученных результатов следует (рисунки 2.24, 2.25, таблица 2.8), что структура и твердость металла шва и ЗТВ зависят в основном от скорости их охлаждения в интервале восемьсот – пятьсот градусов Цельсия. При этом толщина соединяемых деталей не является значимым фактором, так как для данных толщин интенсивность теплоотвода достигает максимального значения. В частности, при скорости охлаждения  $108\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  структура металла шва технологических проб толщиной 18 и 36 мм представлена мартенсито-бейнитной смесью и выделениями видманштетт феррита по границам зерен (рисунок 2.24 а). Максимальная твердость наблюдается в центре шва и составляет 301 HV для толщины 18 мм и 306 HV – для толщины 36 мм (таблица 2.8, рисунок 2.25 д, 2.26 г). При снижении скорости охлаждения до  $98\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в металле шва преобладает бейнитная структура с твердостью 274–249 HV (рисунок 2.25 а, в, г; рисунок 2.26 а, б) и небольшое количество полигонального феррита. При дальнейшем снижении скорости охлаждения до  $42\text{--}38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  характер структуры, в целом, сохраняется, но наблюдается повышение доли феррита. Твердость при этом составляет 231–228 HV (рисунок 2.25 б, е) для пробы «Тэккен» толщиной 18 мм и 236–224 HV – для пробы «Тэккен» толщиной 36 мм (рисунок 2.26 в, е).

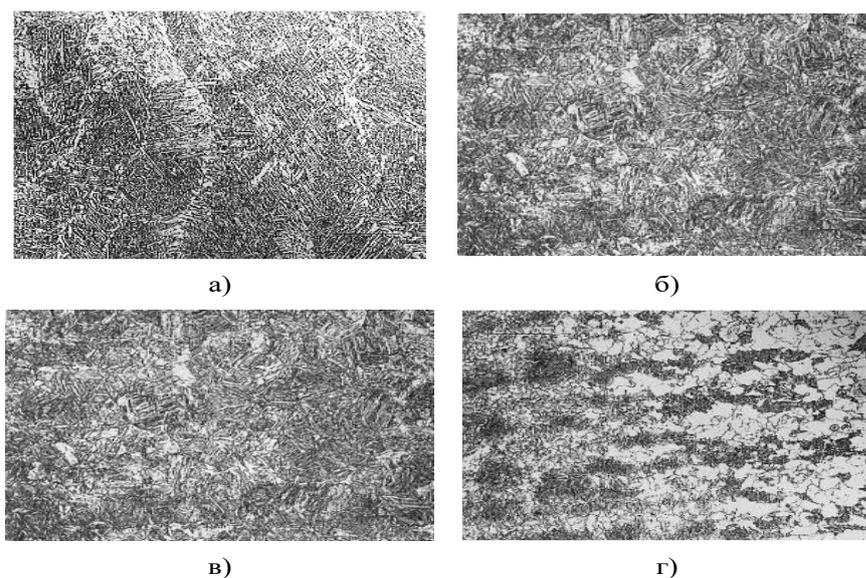


Рисунок 2.24 – Микроструктура сварного соединения образца № 5 (x500):  
 а – металл шва; б – участок перегрева; в – участок полной перекристаллизации; г – участок неполной перекристаллизации

Таблица 2.8 – Результаты испытаний проб «Тэккен»

Маркировка образца	Толщина металла, мм	Температура воздуха, °С	Эффективная погонная энергия, кДж/см	Скорость охлаждения	Твердость, HV <sub>max</sub>		Наличие трещин
					МШ	ЗТВ	
			5	98	268	296	Есть
			10,4	55	253	246	Нет
			1	3	228	232	Нет
		-20	5	108	301	289	Есть
			10,4	6	274	2	Есть
			1	4	231	252	Нет
			5	98			Есть
			10,4	55		271	Нет
			1	3		265	Нет
		-20	5	108			Есть
			10,4	6			Есть
			1	4			Нет

Принимая во внимание, что трещины были выявлены как в зоне термического влияния, так и в металле шва, в работе была исследована микроструктура участка перегрева (см. рисунок 2.24 б), который считается потенциальным местом зарождения ХТ в ЗТВ. Из результатов исследований следует, что при охлаждении ЗТВ со скоростью 108–98 °С/с на участке перегрева формируется малоуглеродистый мартенсит и бейнит с твердостью 296-289 НV для пробы толщиной 18 мм и 329-291 НV – для пробы толщиной 36 мм. В диапазоне скоростей охлаждения 60 – 38 °С/с в структуре зоны перегрева присутствует в основном бейнитная структура с твердостью 268-232 НV для пробы толщиной 18 мм и 252-232 НV – для пробы толщиной 36 мм.

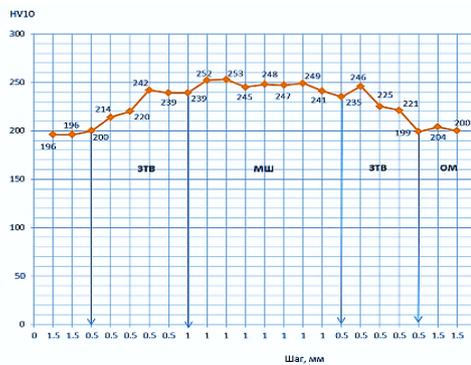
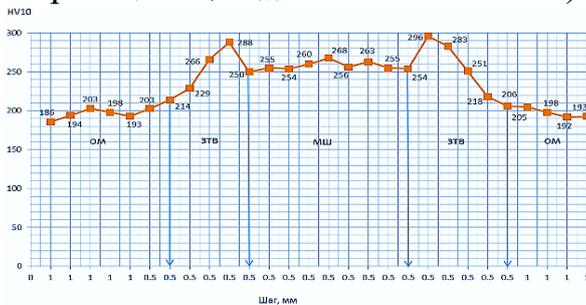
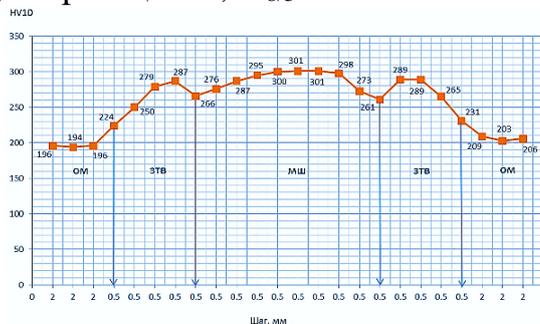
а) Образец № 1,  $V_{8/5}=55$  °C/cб) Образец № 2,  $V_{8/5}=38$  °C/cв) Образец № 3,  $V_{8/5}=98$  °C/cг) Образец № 4,  $V_{8/5}=60$  °C/cд) Образец № 5,  $V_{8/5}=108$  °C/cе) Образец № 6,  $V_{8/5}=42$  °C/c

Рисунок 2.25 – Распределение твёрдости в поперечном сечении сварного шва образцов толщиной 18 мм

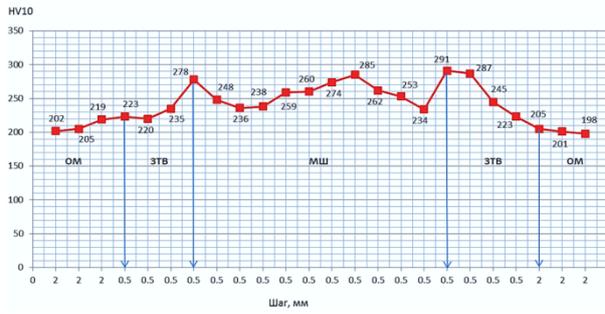
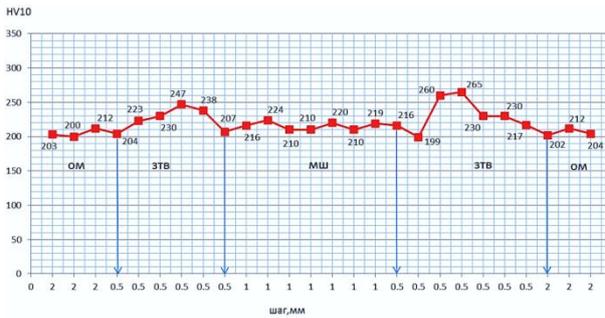
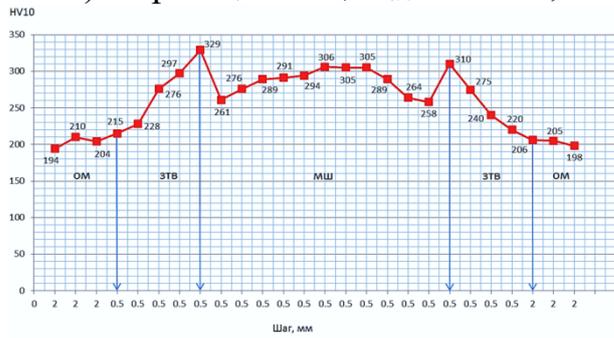
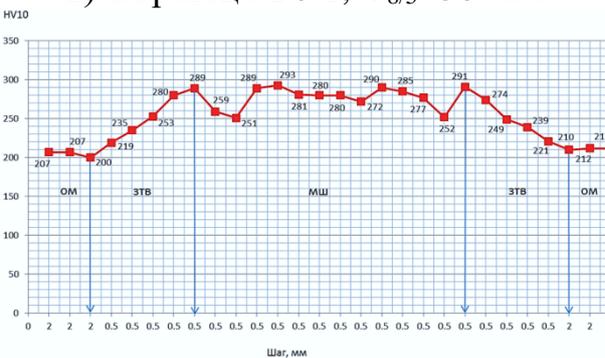
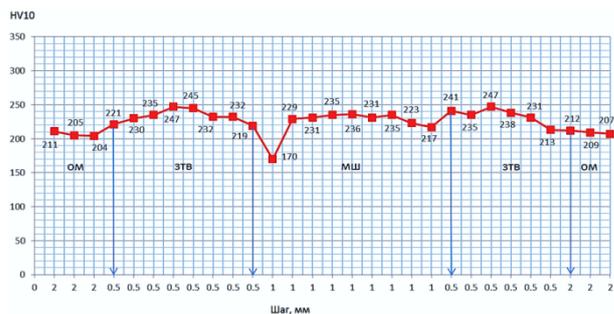
а) Образец № 5-1,  $V_{8/5}=98\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ б) Образец № 4-1,  $V_{8/5}=55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ в) Образец № 6-1,  $V_{8/5}=38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ г) Образец № 2-1,  $V_{8/5}=108\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ д) Образец № 1-1,  $V_{8/5}=60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ е) Образец № 3-1,  $V_{8/5}=42\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ 

Рисунок 2.26 – Распределение твёрдости в поперечном сечении

Из результатов эксперимента следует, что холодные трещины в испытуемом сварном шве не образуются при средней скорости его охлаждения, в интервале температур восемьсот – пятьсот градусов Цельсия, не более  $55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ . В рамках нашего эксперимента эти скорости охлаждения были обеспечены без предварительного подогрева свариваемых кромок за счет регулирования эффективной погонной энергии. При сварке образцов при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  критической скорости охлаждения соответствует эффективная погонная энергия, равная  $10,4\text{ кДж}/\text{см}$ , а при сварке образцов при температуре минус  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $14,9\text{ кДж}/\text{см}$ . Из этого следует, что сталь

PCE500TM 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  $V_{8/5} \leq 55^\circ\text{C}/\text{с}$ , а используемые сварочные материалы – содержание водорода не более 10 мл/100г.

Одним из критериев оценки склонности сварного соединения к появлению ХТ является его твердость.

Согласно [92] твердость металла шва должна быть не выше 280, а ЗТВ – не более 325 HV<sub>10</sub> для сталей с пределом текучести от 460 МПа. В нашем случае критические значения твердости были достигнуты на образцах № 5, 2-1 (см. таблица 2.7), которые были заварены при температуре окружающего воздуха минус 20 °С с эффективной погонной энергии  $Q = 5,8$  кДж/см. В остальных образцах с трещинами твердость металла шва и ЗТВ соответствовала нормативным требованиям [92].

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

Для современных низколегированных высокопрочных сталей более значимыми факторами являются растягивающие остаточные напряжения и насыщенность металла сварного соединения диффузионным водородом.

Для сравнительной оценки влияния эффективной погонной энергии сварки и температуры предварительного подогрева на сопротивление образованию ХТ по формулам (2.4)–(2.5) были рассчитаны скорости охлаждения  $V_{8/5}$  и построены соответствующие зависимости, которые приведены на рисунке 2.27.

Из рисунка 2.27 следует, что наиболее существенное влияние предварительного подогрева на скорость охлаждения  $V_{8/5}$  наблюдается при сварке на малых эффективных погонных энергиях, характерных для ручной дуговой сварки. При увеличении ее величины до значений, характерных для автоматической сварки под флюсом, влияние предварительного подогрева на  $V_{8/5}$  незначительно.

Согласно рисунку 2.27 при сварке стали PCE500TM толщиной 18 мм на режимах, обеспечивающих эффективную погонную энергию на уровне 5,8 кДж/см, ре-

комендуемая в [105] температура предварительного подогрева ( $T_{п} = 100^{\circ}\text{C}$ ) не достаточна, т.к. не обеспечивает требуемую скорость охлаждения  $V_{8/5} \leq 55^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Аналогичные результаты были получены в работе [60] при оценке свариваемости стали 950А. В рассматриваемом нами примере она должна быть не менее  $200^{\circ}\text{C}$ , что считается недопустимым для термически и термомеханически упрочненных низколегированных сталей. В данном случае необходимо увеличить эффективную погонную энергию до значений, не превышающих критическую скорость охлаждения металла ЗТВ сварного соединения.

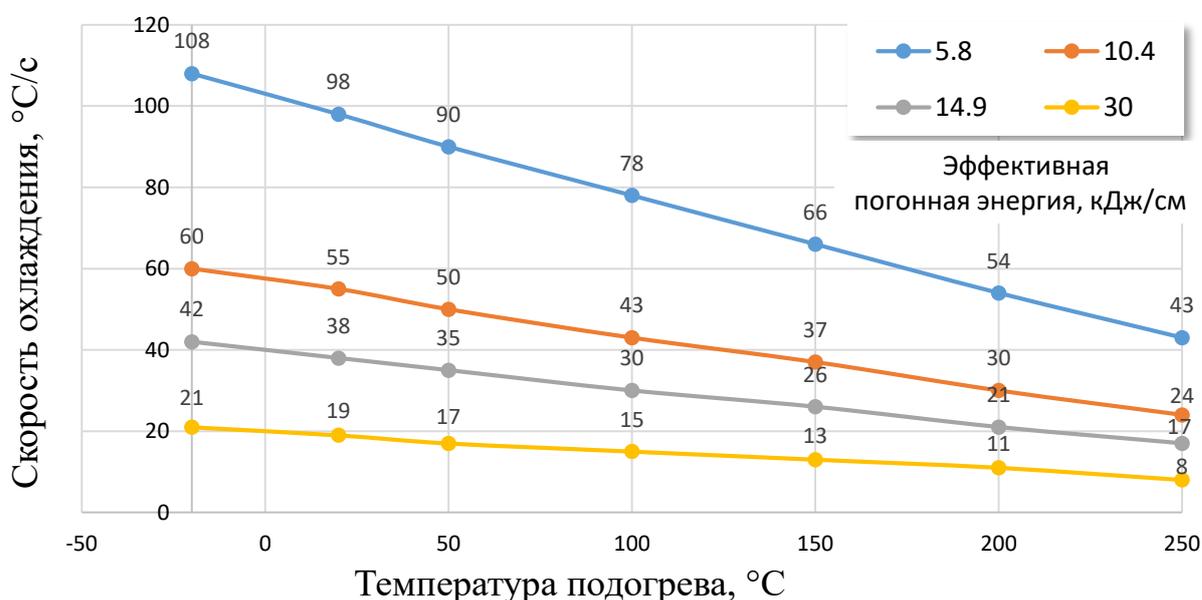


Рисунок 2.27 – Влияния температуры предварительного подогрева и эффективной погонной энергии на скорость охлаждения ЗТВ сварного соединения в диапазоне температур восемьсот – пятьсот градусов Цельсия

По результатам выполненных исследований было определено, что эффективная погонная энергия оказывает значимое влияние на сопротивление появления ХТ в сварном соединении, поэтому при назначении температуры предварительного подогрева, для конкретных режимов и условий выполнения сварного соединения, необходимо учитывать ее величину. В ряде случаев сопротивление образованию ХТ может быть обеспечено без предварительного подогрева свариваемых кромок – за счет регулирования величины эффективной погонной энергии, что позволит снизить трудоемкость и стоимость производства сварочных работ.

## 2.4. Обеспечение сопротивления образованию холодных трещин за счет изменения температуры начала сварки и прочностных характеристик проволок

В разделе 2.3 нами были проведены работы по изучению влияния погонной энергии на склонность к образованию ХТ монтажных сварных соединений. В данном разделе рассмотрим влияние температуры начала сварки и группы прочности сварочной проволоки на сопротивляемость образованию ХТ.

### 2.4.1. Объект исследования

Объектом исследования являются сварные соединения высокопрочной стали PCE500TM толщиной 25,8 мм (см. таблицу 2.9, 2.10), выполненные автоматической сваркой в смеси газов Ar (82 %) + CO<sub>2</sub> (18 %) с использованием различных групп порошковых сварочных проволок диаметром 1,2 мм (таблица 2.11, 2.12). Режимы сварки контрольных сварных соединений приведены в таблице 2.13.

Под группой прочности сварочных материалов в работе приняты характеристики прочности наплавленного ими металла шва.

Таблица 2.9 – Химический состав исследуемой стали по сертификату качества

Массовая доля химических элементов в пробе, %											
C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	S	P
0,06	1,62	0,08	0,04	0,20	0,17	0,11	0,006	0,005	0,03	0,001	0,008

Таблица 2.10 – Механические свойства исследуемой стали по сертификату качества

Предел прочности, МПа	Предел текучести, Мпа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV <sup>-20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
625	555	22,5	314

Таблица 2.11 – Химический состав наплавленного металла по сертификату качества

Марка проволоки	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	V	S	P
ESAB FILARC PZ6125	0,07	0,38	1,22	<0,1	<0,1	0,89	<0,1	<0,01	0,013	0,009
ESAB FILARC PZ6115	0,05	0,37	0,94	<0,1	<0,1	2,50	<0,1	<0,01	0,015	0,009
KOBELCO DW-A70L	0,05	0,30	1,86	0,02	0,44	0,93	–	<0,01	0,007	0,008

Таблица 2.12 – Механические свойства наплавленного металла по сертификату качества

Марка проволоки	Группа прочности по [8]	Предел прочности наплавленного металла, МПа	Предел текучести наплавленного металла, МПа	Относительное удлинение наплавленного металла, %	Работа разрушения KV, Дж
ESAB FILARC PZ6125	Y42	556	445	28,4	109 (–60 °C)
ESAB FILARC PZ6115	Y50	662	557	21	93 –50 °C)
KOBELCO DW- A70L	Y62	724	668	23	88 (–50 °C)

Таблица 2.13 – Режимы сварки проб «Тэккен»

Маркировка пробы	Параметры режима сварки			Эффективная погонная энергия, кДж/см	Температура начала сварки, °C	Скорость охлаждения, °C/с
	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/с			
1	291	28,1	0,43	15,2	20	37
2	290	28,1			103	29
3	290	28,1			-21	41
4	292	28,0			20	37
5	295	27,9			102	30
6	291	28,1			-19	41
7	290	28,1			20	37
8	291	28,1			100	30
9	290	28,1			-22	41

### 2.4.2. Методика испытаний

Для проведения экспериментальных исследований было подготовлено 9 образцов (таблица 2.14), которые, в соответствии с планом эксперимента, отличаются по сопротивляемости образованию ХТ. В качестве варьируемых параметров, влияющих на сопротивление образованию ХТ, были приняты – температура начала сварки и сварочные материалы, отличающиеся по пределу текучести наплавленного металла. Испытания проводились в соответствии с рекомендациями [78] на технологических пробах «Тэккен», изготовленных из стали PCE500TM толщиной 25,8 мм.

Таблица 2.14 – План эксперимента

Температура начала сварки, °С	Маркировка образцов в зависимости от группы прочности сварочной проволоки по пределу текучести		
	$\sigma_{0,2} = 445$ МПа	$\sigma_{0,2} = 557$ МПа	$\sigma_{0,2} = 668$ МПа
-20	№ 3	№ 6	№ 9
20	№ 1	№ 4	№ 7
100	№ 2	№ 5	№ 8

Подогрев проб перед сваркой осуществлялся в муфельной печи, обеспечивающей равномерный нагрев пробы по всему сечению с автоматическим контролем и поддержанием заданной температуры. В печи пробы нагревались до температуры 120 °С с последующей выдержкой в течение 30 минут при этой температуре. Перегрев проб на 20 °С был важен для того, чтобы компенсировать потерю тепла, которая происходит в процессе установки и настройке сварочного робота.

Охлаждение проб до температуры минус 40 °С осуществлялось в морозильной камере с использованием твёрдого диоксида углерода (рисунок 2.28 а). Переохлаждение проб на 20 °С выполнялось по причине нагрева пробы в процессе установки и настройки сварочного робота. Во всех случаях измерение температуры начала сварки производилось с помощью бесконтактного пирометра на необработанной стороне пробы трижды и усреднялось, что обеспечивало получение результатов измерений с минимально возможной погрешностью (таблица 2.15).

Таблица 2.15 – Технические характеристики пирометра

Технические характеристики	Значения параметров
Диапазон температур	-32 до 380 °C (-25.6 до 71 °F)
Точность	25°C(77°F) до 380 °C(71°F)± 2°C или ± 2% 0°C(30°F)до25°C(77°F) ±2°C или± 2% -32°C(-25°F) до 0 °C(30°F)± 3°C или ± 2%
Повторяемость результатов	1% от измеренного или 1°C
Время отклика	500 мкс
Спектральная характеристика	5-14 um
Излучательная способность	Pre-set 5 0.95
Рабочий диапазон окружающей среды	0 до 50°C(32 до 120°F)
Относительная влажность	10-95%
Температура хранения	-20 до 60°C (-4 до 140°F) без батареи
Вес/размеры	145г; 152*130*38мм
Тип источника питания	9v Alkaline или NiCd батарея
Время автономной работы (Alkaline)	16 hrs
Расстояние до размера пятна	12:1



а)



б)

Рисунок 2.28 – Подготовка и сварка пробы «Тэккен» при отрицательной температуре: а) охлаждение пробы перед сваркой; б) общий вид пробы после сварки

Подготовка пробы теккен для сварки при температуре ниже нуля градусов цельсия, а точнее -20 градусов цельсия осуществлялась в морозильной камере с добавлением сухого льда (рис. 2.28 а), контроль температуры выполнялся с использова-

нием электронного пирометра. Через 15 секунд после выполнения основного сварного шва все четыре угла контрольного соединения все еще находятся при отрицательной температуре, что видно на изображении 2.28 б.

Готовые для сварки пробы поочередно устанавливались в позиционер сварочного робота FANUC ARC Mate 120iC, после чего проводилась проверка перемещения горелки в процессе отработки технологии сварки. После измерения температуры выполнялась сварка испытуемого шва на режимах, приведенных в таблице 2.13.

Все последующие работы шли в три этапа. Сначала выдерживали пробу в течение двух суток и выполняли контроль на наличие поверхностных трещин испытуемого сварного шва визуальным методом. Если будут обнаружены поверхностные трещины в сварном соединении, то технология не подлежит одобрению, т.к. не обеспечивает сопротивляемость образованию ХТ. При отсутствии поверхностных трещин в сварном шве исследуемые пробы разрезались на контрольные образцы, поперечные сечения которых проверялись на наличие трещин с помощью оптического микроскопа с увеличением не менее  $\times 50$ . За положительный результат испытания принимался факт отсутствия на макрошлифе сварного соединения трещины длиной более 0,5 мм. Положительный результат испытания подтверждался контролем макрошлифа сварного соединения при увеличении  $\times 200$ .

На втором этапе исследований проводились металлографические и дюрOMETрические испытания с целью оценки влияния структуры сварного соединения на сопротивляемость образованию ХТ. Для проведения этих исследований из всех 9 проб вырезали контрольные образцы (поперечные шлифы), которые были прошлифованы, отполированы и протравлены.

Структура металла сварного соединения исследовалась с помощью оптического микроскопа Axio Observer D1.m, оснащенного программно-аппаратным комплексом для анализа изображений Thixomet Pro. Микротвердость характерных участков сварного соединения определяли по ГОСТ 9450-76 на твердомере FM-800 при нагрузке 2,94 Н (300 гс).

Дополнительно, для анализа сопротивляемости образованию ХТ, были рассчитаны показатели углеродного эквивалента  $CE$ ,  $CET$ ,  $P_{cm}$  (таблица 2.16) и рекомендуемая температура предварительного подогрева  $T_p$  [13]:

Таблица 2.16 – Расчетные показатели углеродного эквивалента и температуры начала сварки (предварительного подогрева)

Марка основного и сварочного материалов		Показатели свариваемости				Расчетная температура начала сварки, °С
		$CE$	$CET$	$P_{cm}$	$CE_N$	
Сталь	PCE500TM	0,398	0,254	0,164	0,392	29,8
		0,46	0,32	0,24	–	
Сварочная проволока	ESAB FILARC PZ6125	0,381	0,234	0,176	0,374	14,3
	ESAB FILARC PZ6115	0,422	0,227	0,168	0,377	8,9
	KOBELCO DW-A70L	0,516	0,304	0,200	0,507	69,0

Примечание. В числителе приведены расчетные значения углеродного эквивалента, в знаменателе – максимально допустимые [13].

На заключительном (третьем) этапе было выполнено численное моделирование процесса сварки проб «Тэккен», выполненных разными сварочными проволоками (таблицы 2.11, 2.12), с целью оценки их влияния на величину и характер распределения остаточных сварочных напряжений (ОС). Причем, в первую очередь важно было установить общие закономерности изменения ОС от температуры начала сварки и класса прочности сварочных материалов, а во вторую – их количественные значения.

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса ESI SYS-WELD, который учитывает температурные деформации, фазовые превращения и деформационное упрочнение металла сварного соединения при формировании ОС.

Задача решалась в геометрически и физически нелинейной постановке с использованием билинейной модели с изотропным упрочнением. При создании сетки модели применялись объемные конечные элементы с меньшими размерами в области металла шва. Количество конечных 3D-элементов в модели составляет

60060 шт., количество узлов – 64081 шт. В связи с тем, что в библиотеке ESI SYSWELD нет сварочных материалов, которые можно было принять в качестве аналогов, используемых для сварки проб «Тэккен», было принято решение поступить следующим образом. Первоначально из библиотеки ESI SYSWELD была выбрана базовая марка сварочной проволоки, которая наиболее близко соответствует стали PCE500TM. Затем эта сварочная проволока была откорректирована в части механических свойств, с учетом свойств сварочных материалов, приведенных в таблице 2.12. В итоге были созданы три новых сварочных материала, которые отличаются от базового только механическими свойствами. Химический состав и физические свойства новых материалов остались такими же, как у базового.

### 2.4.3. Оценка сопротивляемости образованию холодных трещин по результатам испытаний проб «Тэккен»

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 испытываемого сварного шва (рисунок 2.29).

Среднее значение высоты корневой трещины (рисунок 2.30), которое определяли по результатам измерений трех макрошлифов, отобранных от каждой из перечисленных выше проб (рисунок 2.31), составило 59,6 %, 64,8 %, 95,7 % соответственно (таблица 2.17).

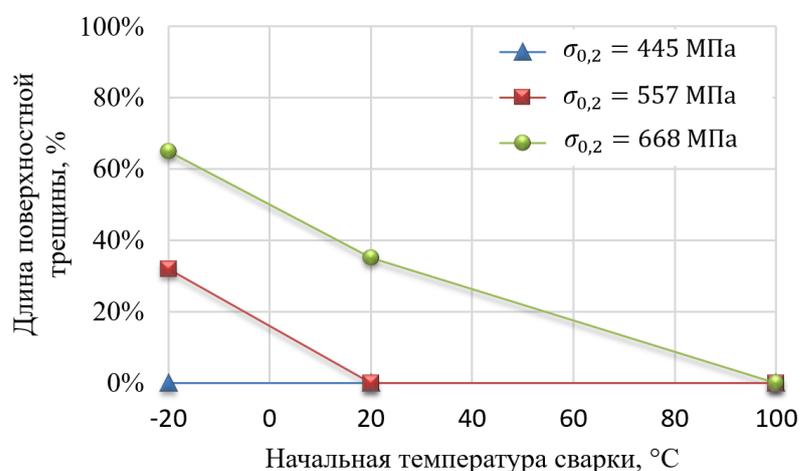


Рисунок 2.29 – Зависимость длины поверхностной трещины от температуры начала сварки и предела текучести сварочной проволоки

Таблица 2.17 – Результаты измерений высоты корневой трещины в пробах «Тэккен»

Маркировка		Н <sub>с</sub> , мм	Н, мм	C <sub>s</sub> , %	Среднее значение C <sub>s</sub> , %
пробы	шлифа				
6	6-1	9,44	9,44	100	64,8
	6-2	3,75	7,98	47,0	
	6-3	4,07	8,59	47,4	
7	7-1	8,30	8,30	100	59,6
	7-2	4,13	8,27	50,0	
	7-3	2,48	8,59	28,9	
9	9-1	7,76	7,76	100	95,7
	9-2	8,94	8,94	100	
	9-3	7,36	8,46	87,0	

Примечание. Относительную высоту корневой трещины (коэффициент растрескивания в сечении шва) определяли по формуле [78]:

$$C_s = \frac{H_c}{H} 100, \quad (2.6)$$

где Н – наименьшая толщина испытуемого сварного шва, мм; Н<sub>с</sub> – высота корневой трещины, мм.

Во всех остальных пробах (№ 1–3, № 5, № 8) поверхностных и корневых трещин не обнаружено. Исключение составляет проба № 4, в одном из крайних шлифов которой была выявлена корневая трещина длиной 0,2 мм. Однако согласно [78] это не является браковочным признаком, т.к. длина трещины меньше 0,5 мм. Из почных результатов следует, что наиболее низкой сопротивляемостью образованию ХТ обладают сварные соединения, выполненные проволокой марки KOBELCO DW-A70L.

Все трещины в пробах зародились в устье конструктивного концентратора и развивались по механизму квазихрупкого разрушения металла шва. Для обеспечения сопротивления образованию ХТ сварку проволокой KOBELCO DW-A70L сталей с пределом текучести 550 МПа и выше следует выполнять с предварительным подогревом до ста градусов Цельсия. В противном случае существует вероятность образования ХТ в металле шва.

Наибольшей сопротивляемостью образованию ХТ обладают сварные швы, выполненные проволокой марки ESAB FILARC PZ612. Сварку стали PCE500TM проволокой этой марки можно выполнять без предварительного подогрева при температуре окружающей среды минус 20 °С и выше – при условии, что величина погонной энергии составляет 15,2 кДж/см.

В сварных швах, пополненных проволокой ESAB FILARC PZ6115, существует вероятность образования холодных трещин при производстве при отрицательной температуре окружающей среды сварочных работ.

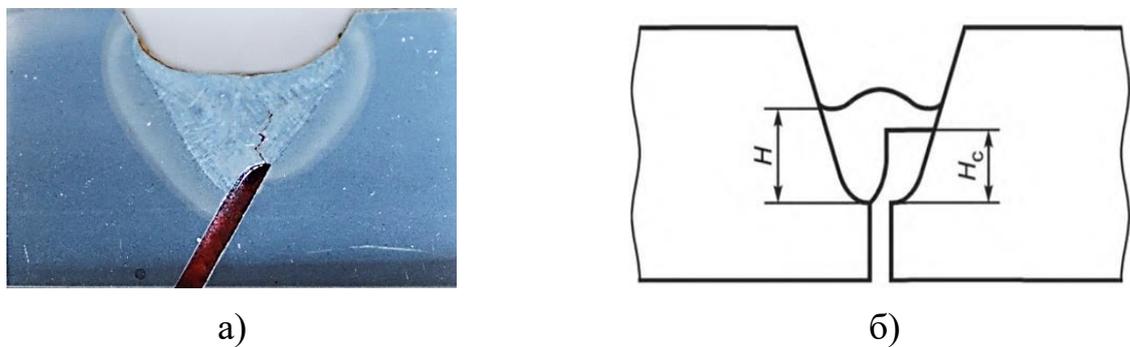


Рисунок 2.30 – Общий вид (а) и схема измерения высоты корневой трещины (б), расположенной в металле шва

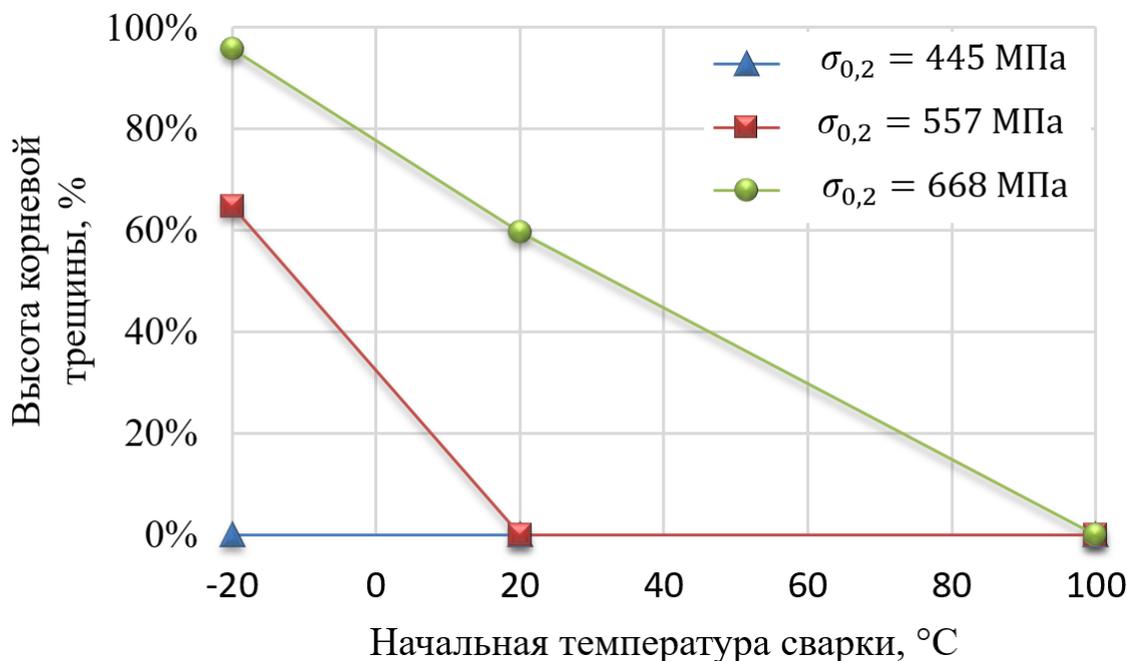


Рисунок 2.31 – Зависимость высоты корневой трещины от температуры начала сварки и предела текучести сварочной проволоки

Из анализа расчетных (см. таблицу 2.16) и экспериментальных (см. рисунки 2.29, 2.31) показателей сопротивляемости образованию ХТ следует, что зависимости типа (1)–(3), которые широко используются в нормативной литературе [10,12,15], не характеризуют должным образом особенности реакции металла сварных соединений современных экономнолегированных сталей высокой прочности на термический цикл сварки.

В частности, из таблицы 2.16 следует, что по показателям  $СЕТ$  и  $P_{cm}$  металл шва и ЗТВ стали PCE500TM не склонны к образованию ХТ, а сварные швы, выполненные проволокой марки ESAB FILARC PZ6115 (образцы № 4–6), должны обладать наилучшей сопротивляемостью образованию ХТ, что не соответствует действительности.

Дело в том, что современные экономнолегированные высокопрочные стали отличаются от классических высокопрочных уникальной лигатурой, которая в значительной мере определяет их прочность и сопротивляемость образованию ХТ, что не учитывается в должной мере в (1)–(3) [67].

#### **2.4.4. Результаты металлографических и дюрOMETрических исследований**

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 (рисунок 2.32).

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 более детальном 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 HV0.3.

В зоне термического влияния твердость существенно ниже и не превышает 290 HV0.3 (рисунок 2.33). 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 HV0.3. Мартенситной фазы в данных образцах не наблюдается, поэтому применение предварительного подогрева до 100 °С не оказало значимого влияния на структуру и твердость испытываемых сварных швов (рисунки 2.32, 2.33).

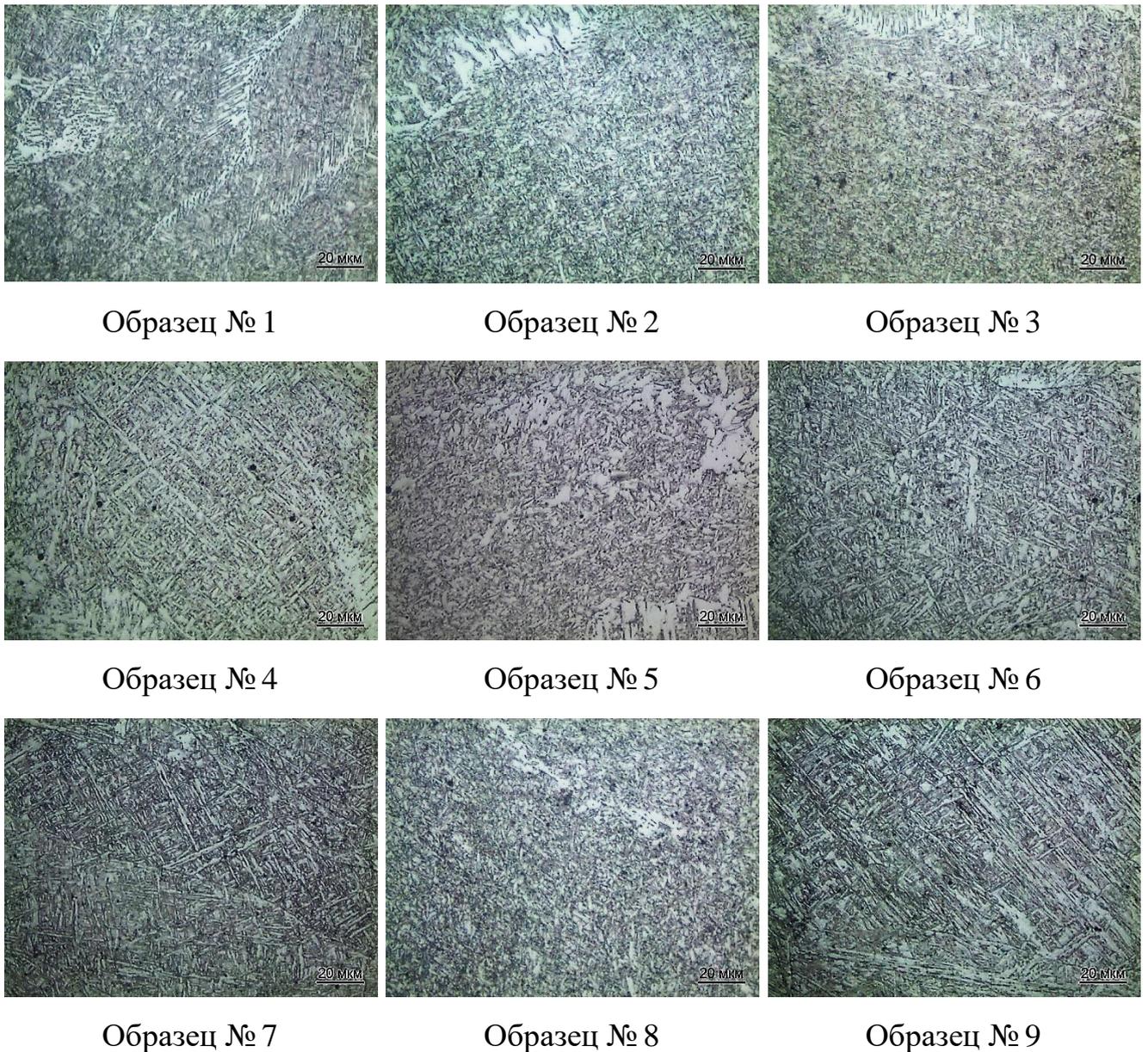


Рисунок 2.32 – Микроструктура металла шва проб «Тэккен», х200

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 (рисунок 2.32). Наличие мартенситной фазы подтверждается относительно высокой микротвердостью металла шва, которая составляет  $370 \text{ HV}_{0.3}$  (рисунок 2.34).

Как отмечалось выше, для повышения сопротивляемости образованию ХТ сварку проволокой марки KOBELCO DW-A70L следует выполнять предварительным подогревом до ста градусов цельсия, который приводит к снижению микротвердости (рисунок 2.34) и доли мартенситной составляющей в структуре металла шва (рисунок 2.32).

Металл шва образцов № 4–6, выполненных проволокой марки ESAB FILARC PZ6115, состоит из игольчатого феррита и бейнита с твёрдостью  $290\text{--}310 \text{ HV}_{0.3}$  (рисунок 2.35). Причем бóльшие значения микротвердости соответствуют образцу № 6, в котором была обнаружена поверхностная трещина.

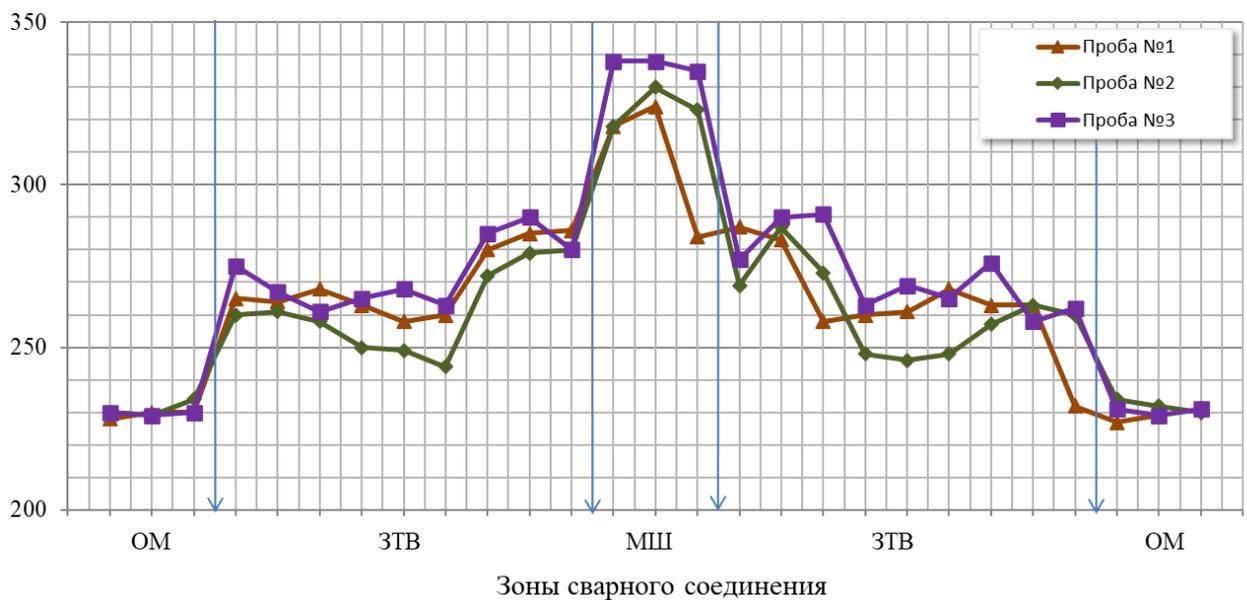


Рисунок 2.33 – Графики распределения микротвердости образцов № 1, 2, 3, выполненных проволокой марки ESAB FILARC PZ6125, по зонам сварного соединения: OM – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; МШ – наплавленный металл

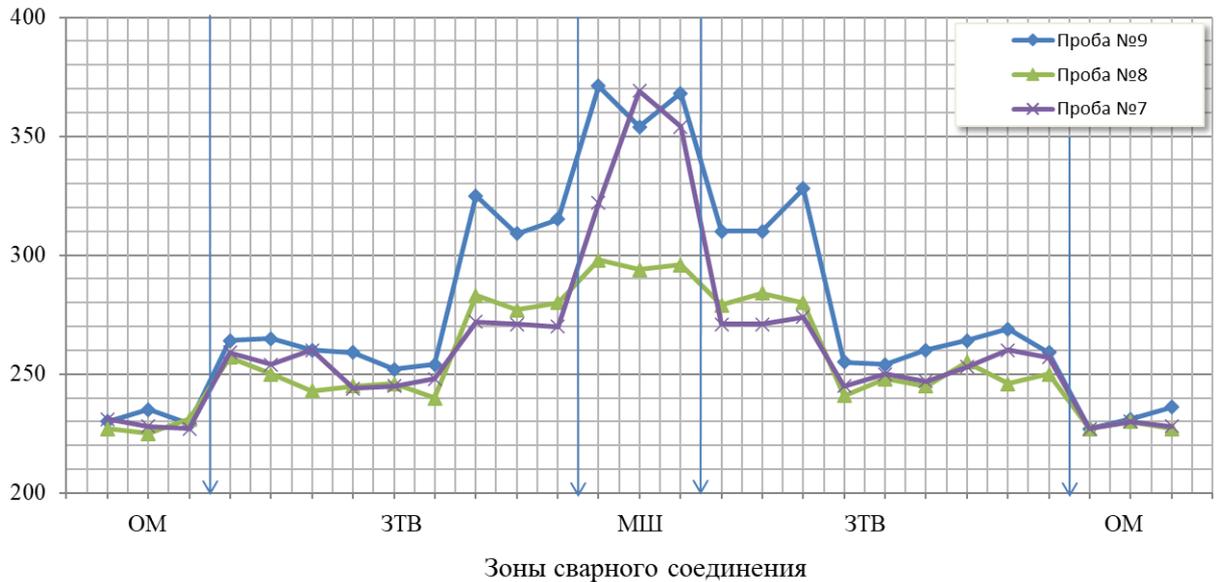


Рисунок 2.34 – Графики распределения микротвердости образцов №7, 8, 9, выполненных проволокой марки КОBELCO DW-A70L, по зонам сварного соединения: ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; МШ – наплавленный металл

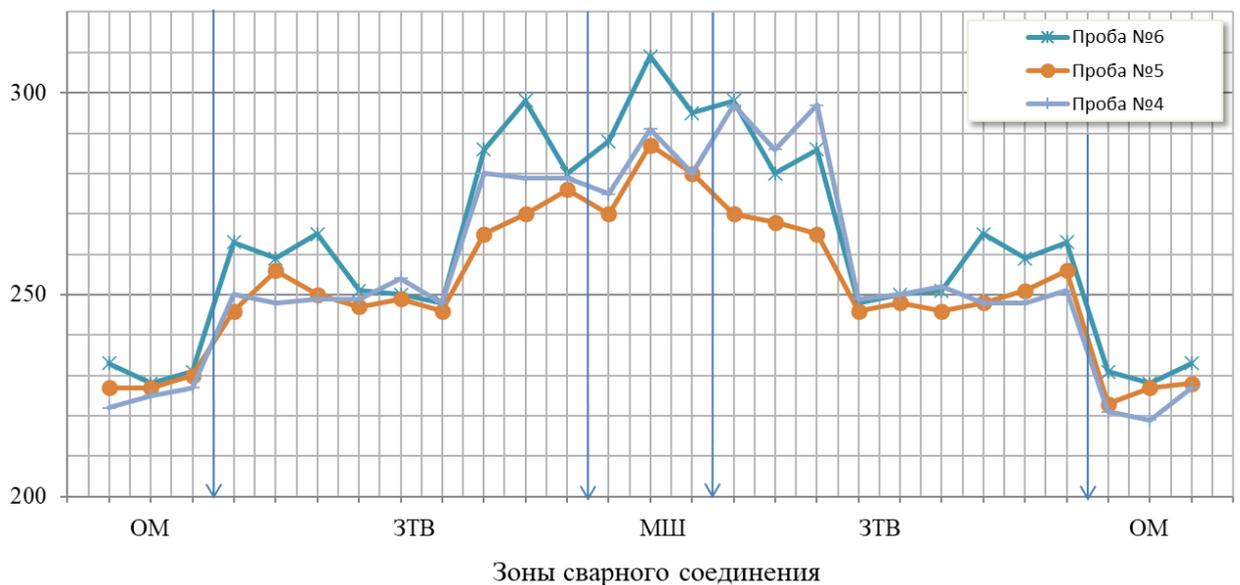


Рисунок 2.35 – Графики распределения микротвердости образцов №4, 5, 6, выполненных проволокой марки ESAB FILARC PZ6115, по зонам сварного соединения: ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; МШ – наплавленный металл

### 2.4.5. Результаты численного моделирования остаточных напряжений в пробе «Тэккен»

Как отмечалось выше, моделирование процесса сварки проб «Тэккен» выполнялось с помощью программного комплекса ESI SYSWELD, который позволяет учитывать температурные деформации, фазовые превращения и деформационное упрочнение металла сварного соединения при формировании ОС. 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 (рисунок 2.36, таблица 2.18).

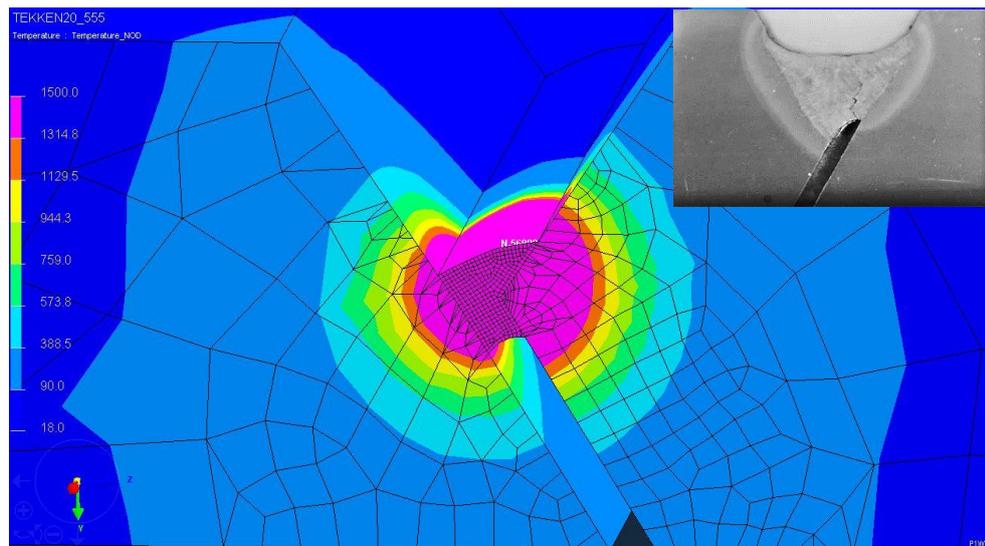


Рисунок 2.36 – Температурное поле в сечении пробы «Тэккен»

Таблица 2.18 – 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 первую очередь в корне шва (рисунки 2.37, 2.38). 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.

Величина максимальных растягивающих ОС в зонах концентрации напряжений изменяется в диапазоне от 1079 до 1332 МПа и зависит от предела текучести наплавленного металла и температуры начала сварки (рисунок 2.39). При этом наиболее существенное влияние на величину ОС оказывает класс прочности сварочных материалов и в меньшей мере температура начала сварки. Так, например, при изменении (увеличении или уменьшении) предела текучести наплавленного металла на 110 МПа относительно предела текучести основного металла, максимальные истинные растягивающие ОС изменяются в среднем на эту же величину (100–120 МПа, рисунок 2.39). При предварительном подогреве кромок перед сваркой до 100 °С снижение максимальных растягивающих ОС составляет 26–41 МПа, что не превышает 3 %.

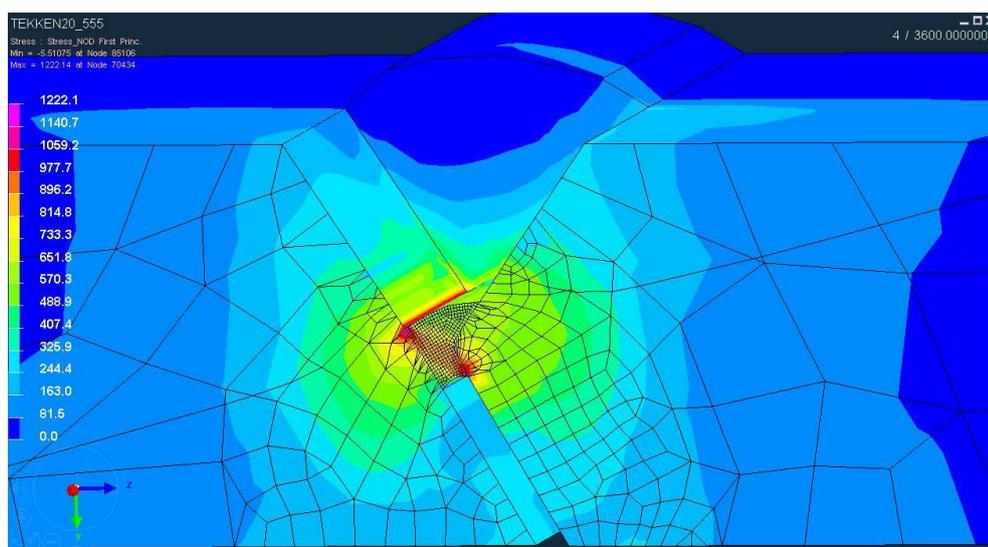


Рисунок 2.37 – Поле первых главных (максимальных растягивающих) остаточных сварочных напряжений в поперечном сечении пробы «Тэккен» после остывания до температуры 20 °С

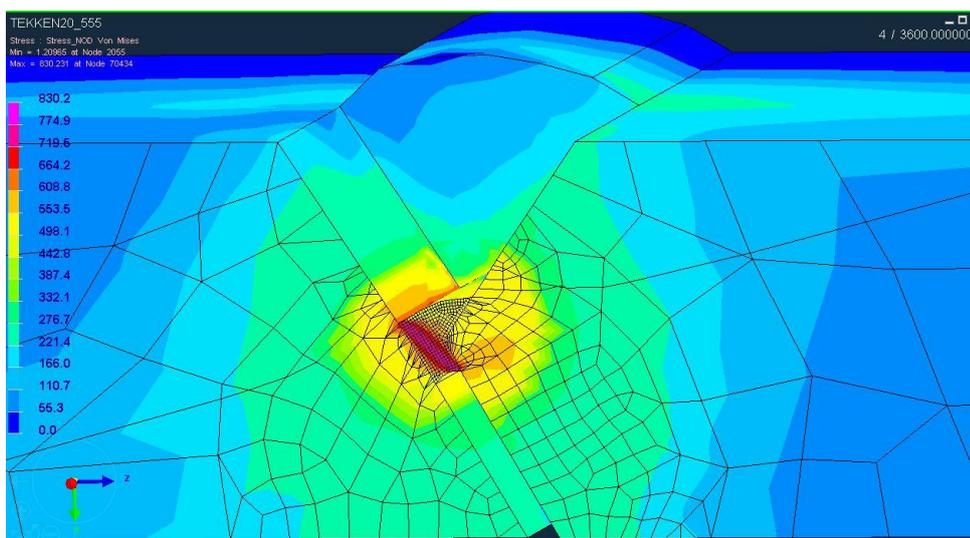


Рисунок 2.38 – Поле остаточных напряжений по Мизесу в поперечном сечении пробы «Тэккен» после остывания до температуры 20 °С

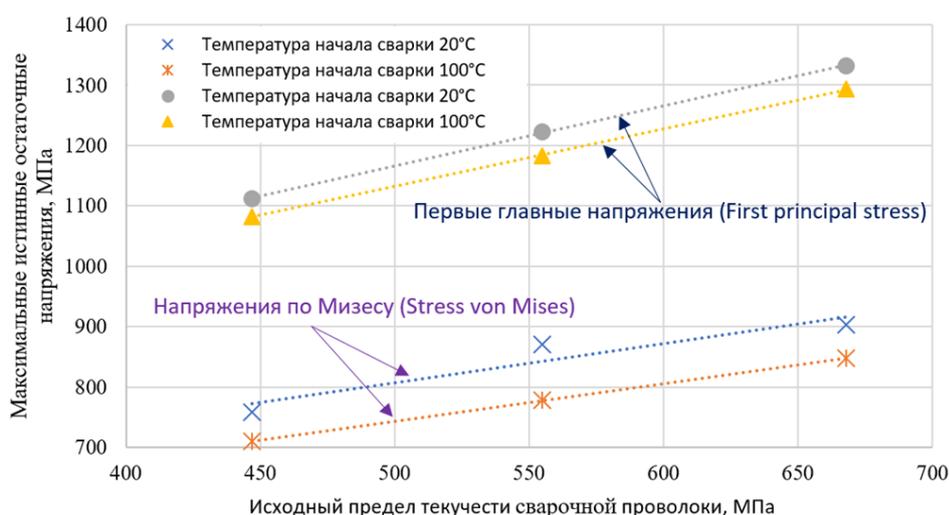


Рисунок 2.39 – Графики зависимости максимальных остаточных сварочных напряжений от исходного предела текучести сварочной проволоки для различных температур начала сварки

Здесь следует отметить, что полученные результаты, в том числе и уравнения регрессии, являются первым приближением вида зависимостей ОС от варьируемых параметров, т.к. в рамках настоящей работы не удалось в полной мере учесть влияние фазовых и структурных превращений на величину ОС. Превышение величины ОС значений предела текучести наплавленного металла, которые приведены в сертификатах на сварочные материалы (см. таблицу 2.12), обусловлено существенным

деформационным упрочнением металла шва в пробе «Тэккен» (рисунок 2.40), которая обладает значительной жёсткостью и концентрацией напряжений в корне шва.

Уравнения регрессии, полученные с использованием линейной модели:

$$\sigma_{0,2}^{\text{Расч}} = 0,7193 \cdot \sigma_{0,2} + 474 \text{ для температуры начала сварки } 20^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{0,2}^{\text{Расч}} = 0,6696 \cdot \sigma_{0,2} + 456 \text{ для температуры начала сварки } 100^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

$$\sigma_1 = 0,9953 \cdot \sigma_{0,2} + 668 \text{ для температуры начала сварки } 20^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

$$\sigma_1 = 0,9549 \cdot \sigma_{0,2} + 654 \text{ для температуры начала сварки } 100^\circ\text{C} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{Mises} = 0,6244 \cdot \sigma_{0,2} + 431 \text{ для температуры начала сварки } 100^\circ\text{C}. \quad (2.11)$$

$$\sigma_{Mises} = 0,6533 \cdot \sigma_{0,2} + 480 \text{ для температуры начала сварки } 20^\circ\text{C}. \quad (2.12)$$

Здесь  $\sigma_{0,2}^{\text{Расч}}$  – расчетный предел текучести сварного шва, МПа;  $\sigma_{0,2}$  – исходный предел текучести сварочной проволоки, МПа;  $\sigma_1$  – первые главные остаточные сварочные напряжения (максимальные растягивающие), МПа;  $\sigma_{Mises}$  – напряжения по Мизесу, МПа.

Степень рассеяния расчетных и экспериментальных данных оценивалась коэффициентом корреляции, величина которого для уравнений (2.7)–(2.11) составляет не менее 0,99, а для уравнения (2.12) – 0,9.

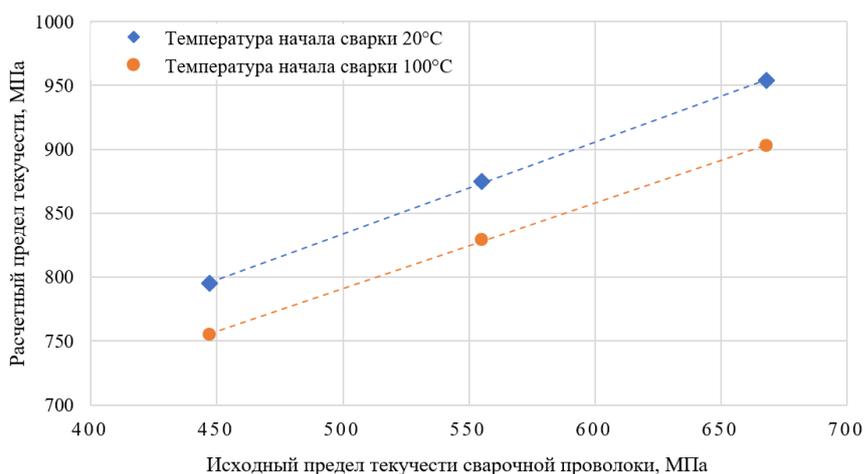


Рисунок 2.40 – Графики зависимости расчётных значений предела текучести металла шва от исходного предела текучести сварочной проволоки для различных температур начала сварки

## 2.5. Выводы по главе 2

1. Предложены критерии выбора технологической пробы из высокопрочных сталей для оценки сопротивления образованию ХТ сварных соединений, которые включают в себя оценку жесткости напряженно-деформированного состояния, возможности обеспечения зарождения трещины в ЗТВ и в металле шва, уровень известности и применимости пробы российским и мировым профессиональным сообществом, а также оценку количества проб и трудоемкость испытаний. На основании предложенных критериев установлено, что для оценки риска появления холодных трещин высокопрочных сталей лучшей пробой является проба «Тэккен», которая хорошо известна как в России, так и в Мире.

2. Компьютерное моделирование процесса сварки высокопрочной стали PCE500TM показало, что степень жесткости пробы «Тэккен» не ниже, чем в тавровом сварном соединении с конструктивным непроваром, являющимся одним из наиболее жестких типов сварных соединений с угловыми швами. В частности, уровень максимальных растягивающих напряжений в пробе «Тэккен» на 5–10 % выше соответствующих напряжений в корневом валике углового шва таврового соединения, что позволяет распространить область одобрения результатов испытаний стыкового шва пробы «Тэккен» на угловые швы судокорпусных конструкций.

3. Из результатов испытаний проб «Тэккен» следует, что трещины в образцах, выполненных сварочными проволоками классов прочности Y42 (ESAB FILARC PZ6125), Y50 (ESAB FILARC PZ6115), Y62 (KOBELCO DW-A70L), зародились в устье конструктивного концентратора и развивались по механизму квазихрупкого разрушения по металлу шва. Трещин в ЗТВ сварных соединений, выполненных на стали PCE500TM с эффективной погонной энергией сварки 15,2 кДж/см, – не обнаружено.

4. С увеличением класса прочности сварочных материалов возрастает вероятность образования холодных трещин, особенно при сварке в условиях воздействия низких температур. В частности, низкая сопротивляемость образованию холодных

трещин порошковой проволоки KOBELCO DW-A70L ( $\sigma_{0,2} = 668$  МПа) 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 (до 1332 МПа) уровнем растягивающих ОС напряжений в зонах конструктивных концентраторов напряжений в пробе «Тэккен».

5. Наиболее благоприятной микроструктурой металла сварного соединения, обладающей максимальной сопротивляемостью образованию холодных трещин, является ферритно-бейнитная структура с ферритом игольчатой морфологии. Данный тип микроструктуры был выявлен в сварных соединениях, выполненных менее прочной ( $\sigma_{0,2} = 445$  МПа), по отношению к основному металлу ( $\sigma_{0,2} = 557$  МПа), порошковой проволокой марки ESAB FILARC PZ6125.

6. Установлено, что величина эффективной погонной энергии в диапазоне от 5,8 до 14,9 кДж/см, который является типичным для ручной дуговой сварки на монтажной площадке при температуре наружного воздуха от –20 до 20 °С, оказывает значимое влияние на риск появления холодных трещин сварных соединений из стали PCE500TM.

При сварке образцов при температуре 20 °С – критической скорости охлаждения, при которой не образуются холодные трещины, 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 PCE500TM толщиной до 36 мм может быть сварена без предварительного подогрева при условии, что назначенные режимы ручной дуговой сварки обеспечивают среднюю скорость охлаждения в ЗТВ сварного соединения на уровне  $V_{8/5} \leq 55$  °С/с, а используемые сварочные материалы обеспечивают содержание диффузионного водорода в наплавленном металле электродами ESAB МТГ-01К не более 10 мл/100 г.

7. Величина максимальных растягивающих остаточных сварочных напряжений, линейно зависит от предела текучести наплавленного металла и температуры начала сварки. При этом наиболее существенное влияние на величину ОС оказывает класс прочности сварочных материалов и в меньшей мере температура начала

сварки. Так, например, при изменении (увеличении или уменьшении) предела текучести наплавленного металла на 110 МПа относительно предела текучести основного металла, максимальные истинные растягивающие ОС изменяются аналогичным образом на эту же величину (100–120 МПа). Эффект снижения максимальных растягивающих ОС от предварительного подогрева до 100 °С составляет 26–41 МПа, что не превышает 3 %.

### 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С «МЯГКИМИ» УГЛОВЫМИ ШВАМИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### 3.1. Методика расчётной оценки прочности

В конструкциях морских судов значительную долю соединений элементов металлоконструкций составляют тавровые соединения с угловыми швами, которые работают в различных условиях. С точки зрения схемы нагружения наиболее часто встречаются варианты, представленные на рисунке 3.1. Согласно [65] при выполнении сравнительного анализа прочности тавровых сварных соединений, отличающихся материалом и/или размером катета  $a$ , и при условии  $a < h_1/2$ , допускается рассматривать только первый вариант нагружения (рисунок 3.1а), соответствующий схеме нормального отрыва.

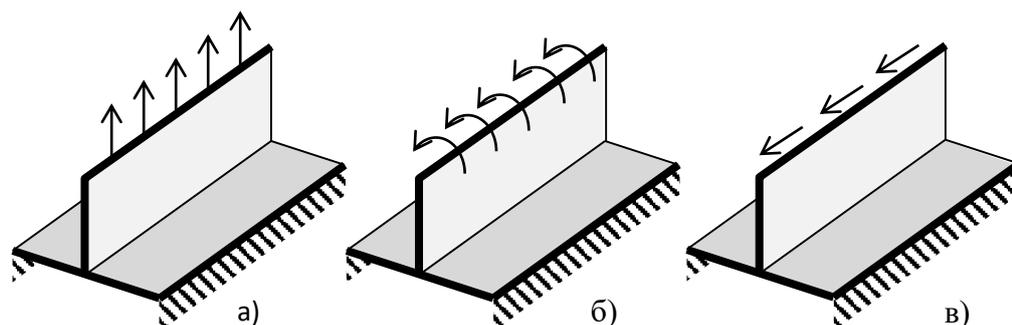


Рисунок 3.1 – Варианты нагружения таврового соединения:

- а – распределенная нагрузка, вызывающая отрыв стенки от полки;
- б – распределенный изгибающий момент, приложенный к стенке;
- в – распределенная нагрузка, вызывающая сдвиг стенки

Тавровые соединения могут выполняться с полным проваром стенки тавра и гарантированным непроваром. Наиболее опасным вариантом является тавровое соединение, выполненное с гарантированным непроваром. При плотном прилегании стенки тавра к полке образуется трещиноподобный концентратор напряжений в виде непровара с вершиной в корне углового шва. При нагружении такого соединения в корне шва наблюдается высокая концентрация напряжений, в результате чего начало разрушения, как правило, наступает в вершине непровара. Поэтому для

оценки прочности тавровых соединений с непроваром необходимо исследовать особенности напряжённого состояния, действующего вблизи его вершины.

Для обоснования выбора варианта исполнения таврового сварного соединения с непроваром в диссертации разработана методика расчетной оценки его работоспособности. Методика применяется на стадии поверочных расчетов – после выбора основных размеров соединяемых деталей и катета сварного шва. В ходе выполнения расчетов анализируются условия обеспечения прочности сварного соединения при вязком, квазихрупком, хрупком и усталостном разрушении.

В качестве типового варианта рассматривается тавровое соединение с конструктивным непроваром, в котором принято, с ошибкой в запас прочности, что размер непровара равен толщине ребра (рисунок 3.2).

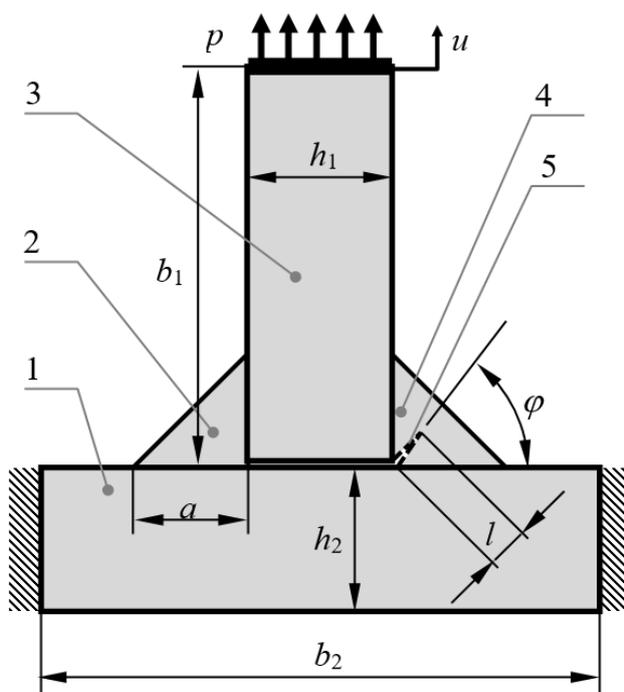


Рисунок 3.2 Расчетная схема соединения.

1, 3 – соединяемые детали; 2, 4 – сварные швы; 5 – трещина.  
 $a$  – катет сварного шва,  $l$ ,  $\varphi$  – размер и положение трещины,  
 $u$  – перемещение сечения приложения нагрузки

Размеры моделируемых участков стенки  $b_1$  и полки  $b_2$  выбираются достаточно большими, для того чтобы исключить влияние этих величин на напряженно-деформированное состояние сварных швов. Как правило, следует выбирать  $b_1 \geq 4h_1$  и

$b_2 \geq 4h_2$ . Корректность выбора величин  $b_1$  и  $b_2$  должна быть подтверждена результатами расчетов напряженно-деформированного состояния сварного шва: при увеличении  $b_1$  и  $b_2$  выше выбранных значений – напряжения в шве должны меняться не более чем на 3 %.

В рассматриваемую конструкцию был включен трещиноподобный дефект, являющийся продолжением конструктивного непровара. Длина этого дефекта ( $l$  на рисунке 3.2) задается равной максимальной величине дефекта, пропускаемой методами неразрушающего контроля. При выполнении сравнительного анализа швов, отличающихся материалом и/или размером катета  $a$ , допускается обоснование величины  $l$  не выполнять, заменяя его выполнением серии расчетов с различными значениями  $l$  и соответствующим анализом результатов. Расчет характеристик прочности соединения выполняется для различных значений угла  $\varphi$ , который характеризует направление развития трещины (рисунок 3.3,  $\varphi = 15, 30, 45$  и  $60^\circ$ ); из полученных вариантов выбирается наилучший.

Обобщенный алгоритм расчетной оценки конструкционной прочности сварного соединения приведен на рисунке 3.3.

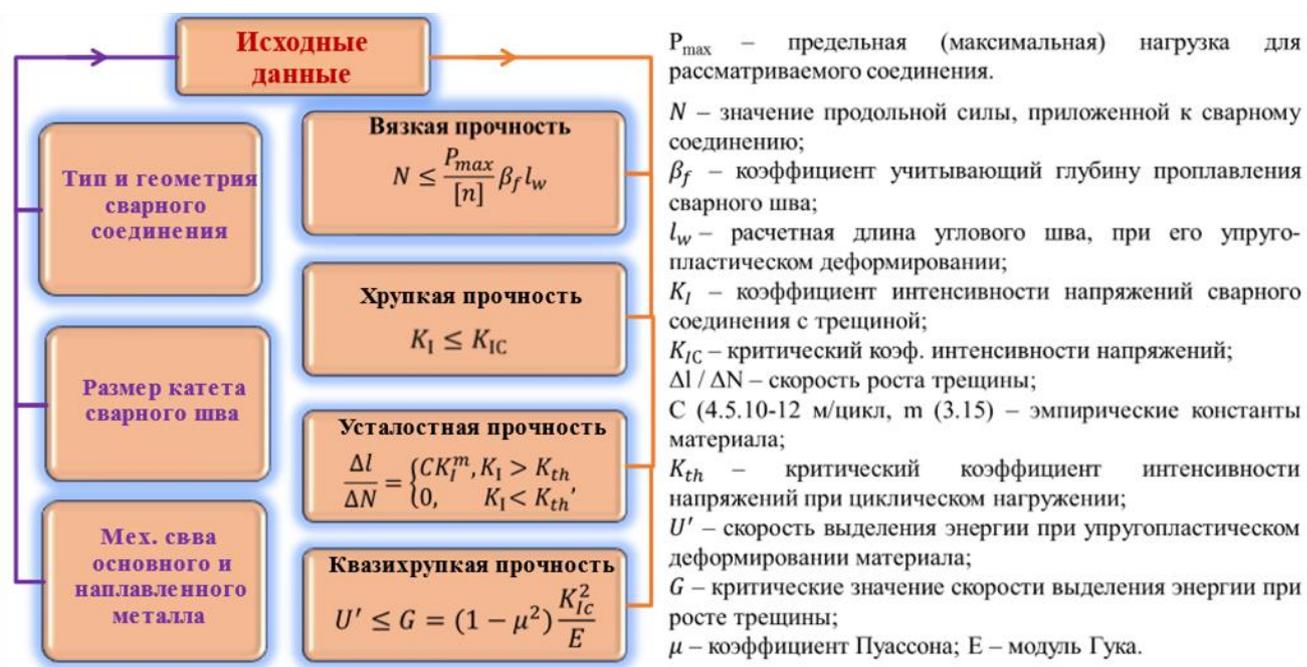


Рисунок 3.3 – Алгоритм расчетной оценки конструкционной прочности сварного соединения

Для выполнения анализа используются данные сертификатов на материалы: предел текучести  $R_{p0.2}$ , предел прочности  $R_m$ , ударная вязкость  $KCV$ , при наличии прямых экспериментальных данных – дополнительно: критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  и параметры  $C, m$  формулы Пэриса, характеризующие усталостный рост трещины [9]. Испытания по определению свойств должны выполняться в соответствии со стандартами [76, 77, 79, 99] либо [5, 6, 7, 8].

Методики использования свойств и восстановления недостающих свойств (по корреляционным зависимостям) описаны далее в соответствующих разделах.

Как отмечалось выше, разработанная методика предназначена для выполнения поверочных расчетов на прочность таврового сварного соединения. В рамках настоящей работы величину катета углового шва определяли из условия [104]:

$$a = \frac{N}{\beta_f l_w R_{wf} \gamma_c}, \quad (3.1)$$

где  $N$  – продольная сила, приложенная к сварному соединению;  $\beta_f$  – коэффициент, учитывающий глубину проплавления сварного шва;  $l_w$  – расчетная длина сварного шва;  $R_{wf}$  – расчетное сопротивление условному срезу по металлу шва;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

При замене равнопрочного углового шва на аналогичный шов с меньшей прочностью, условие равнопрочности соединения обеспечивалось за счет увеличения его катета, который рассчитывался по формуле

$$a_2 = a_1 \frac{R_{wf}^1}{R_{wf}^2}, \quad (3.2)$$

где  $a_1$  – катет равнопрочного сварного шва;  $a_2$  – катет шва с меньшей прочностью;  $R_{wf}^1$  – расчетное сопротивление условному срезу равнопрочного шва;  $R_{wf}^2$  – расчетное сопротивление условному срезу сварного шва с меньшей прочностью.

Значения расчетного сопротивления условному срезу, используемые в выражении (3.2), определяли по формуле

$$R_{wf}^{1(2)} = 0.55 \frac{R_{wun}^{1(2)}}{\gamma_{wm}}. \quad (3.3)$$

Здесь  $R_{wm}^{1(2)}$  – нормативное сопротивление равнопрочного (1) и «мягкого» (2) металла шва по временному сопротивлению при растяжении;  $\gamma_{wm}^{1(2)}$  – коэффициент надежности по материалу равнопрочного (1) и «мягкого» (2) сварного шва.

Формула (3.2) получена из (3.1) при решении соотношения  $a_2/a_1$  относительно  $a_2$ .

### 3.1.1. Анализ возможности хрупкого разрушения

Анализ проводится путем расчета коэффициента интенсивности напряжений около вершины гипотетической трещины (п. 3.2) и сравнения его с допускаемым значением. При сравнительных расчетах (сопоставление разных вариантов исполнения шва) определяются фактические коэффициенты запаса, равные отношению расчетного значения коэффициента интенсивности напряжений к критическому.

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. Расчетная процедура должна позволять определять величины коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  (последний – при использовании схемы нагружения сдвигом, рисунок 3.1 в). Процедура строится в соответствии с рекомендациями, приведенными в документации на соответствующий пакет. Обязательным условием является доказательство того, что выбранное разбиение конструкции на конечные элементы обеспечивает независимость результатов от величины элементов (при их дальнейшем измельчении); проверка осуществляется сопоставлением результатов расчетов, выполненных с различными разбиениями конструкции на конечные элементы.

Значение угла  $\varphi$ , характеризующего положение трещины (рисунок 3.2), выбирается таким, чтобы соответствующее ему расчетное значение  $K_I$  было максимальным (при этом  $K_{II} = 0$ ).

Полученное расчетом значение коэффициента интенсивности напряжений сопоставляется с допускаемым.

Допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений определяется по формуле (3.4) [95]

$$[K_I] = \min\left(\frac{K_{Ic}(T_p)}{n_k}, K_{Ic}(T_p - \Delta T)\right) \quad (3.4)$$

где  $K_{Ic}(T_p)$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при рабочей температуре  $T_p$ ,  $n_k = 2$  (коэффициент запаса),  $\Delta T$  – температурный запас,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ .

Критический коэффициент  $K_{Ic}$  определяется по стандарту [73] либо [6]. При отсутствии результатов испытаний по определению  $K_{Ic}$  допускается рассчитывать его по зависимости, связывающей  $K_{Ic}$  с величиной удельной работы разрушения  $KCV$  [47-49]:

$$K_{Ic} = R_{p0,2} \sqrt{0.64 \left(\frac{KCV}{R_{p0,2}}\right) - 0.01} \quad (3.5)$$

Здесь  $KCV$  – работа разрушения образца Шарпи с V-образным надрезом, Дж;  $R_{p0,2}$  – предел текучести материала, МПа,  $K_{Ic}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м<sup>1/2</sup>.

### 3.1.2. Анализ возможности вязкого разрушения

Возможность вязкого разрушения определяли посредством расчета предельной нагрузки и вычисления коэффициента запаса, определяемого как отношение предельной нагрузки к рабочей. Коэффициент запаса, при этом должен быть не меньше, чем  $[n] = 2$ .

Анализ вязкого разрушения выполняется численным методом с использованием метода конечных элементов и реализующих его пакетов программ. 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 по формулам (3.6), приведенным в стандарте [4]:

$$\varepsilon_{ts} = \frac{\sigma_t}{E_y} + \gamma_1 + \gamma_2$$

$$\gamma_1 = \frac{\varepsilon_1}{2} [1.0 - \tanh(H)], \quad \gamma_2 = \frac{\varepsilon_2}{2} [1.0 + \tanh(H)]$$

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\sigma_t}{A_1}\right)^{\frac{1}{m_1}} A_1 = \frac{\sigma_{ys}(1 + \varepsilon_{ys})}{[\ln(1 + \varepsilon_{ys})]^{m_1}} m_1 = \frac{\ln(R) + (\varepsilon_p - \varepsilon_{ys})}{\ln\left[\frac{\ln(1 + \varepsilon_p)}{\ln(1 + \varepsilon_{ys})}\right]}$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\sigma_t}{A_2}\right)^{\frac{1}{m_2}} A_2 = \frac{\sigma_{uts} \exp(m_2)}{m_2^{m_2}} m_2 = 0.60(1 - R)$$

$$H = \frac{2(\sigma_t - [\sigma_{ys} + K(\sigma_{uts} - \sigma_{ys})])}{K(\sigma_{uts} - \sigma_{ys})}$$

$$R = \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{uts}}; K = 1.5R^{1.5} - 0.5R^{2.5} - R^{3.5} \quad (3.6)$$

Здесь обозначено:  $\sigma_{ys}$  – предел текучести,  $\sigma_{uts}$  – предел прочности [72],  $\varepsilon_{ys} = 0.002$  – пластическая деформация, соответствующая пределу текучести. После достижения напряжением величины

$$\sigma_{uts,t} = \sigma_{uts} \exp[m_2] \quad (3.7)$$

диаграмма деформирования аппроксимируется горизонтальной прямой ( $\sigma = \sigma_{uts,t}$ ).

В результате анализа для модели, показанной на рисунок 3.2, должна быть получена зависимость «нагрузка – перемещение», по которой определяется предельная (максимальная) нагрузка для рассматриваемого соединения.

С учетом выполненных преобразований (3.1)–(3.3) критерий вязкого разрушения таврового сварного соединения с угловыми швами будет иметь следующий вид:

$$\frac{N_i}{\beta_f l_{wi} a_i} \leq R_{wf} \gamma_c \quad (3.8)$$

$a_i, l_{wi}$  – текущее (итерационное) значение катета и расчетной длины углового шва, при его упругопластическом деформировании;  $N_i$  – текущее (итерационное) значение продольной силы, приложенной к сварному соединению.

Решение уравнения (3.1) возможно выполнить только численным методом, который позволяет учитывать изменение геометрии сечения сварного соединения в процессе его упругопластического деформирования.

### 3.1.3. Анализ возможности квазихрупкого разрушения

Анализ выполняется путем расчета энергетической характеристики – скорости выделения энергии при росте трещины – и сравнения ее с критическим значением. Критическое значение должно быть определено экспериментально для тех же условий (того же уровня пластических деформаций), что в реальной конструкции. При отсутствии результатов испытаний допускается выполнять расчет как сравнительный, используя в качестве базы сравнения соотношение выделения энергии и затрат энергии на хрупкое разрушение, определяемых по формуле

$$G = (1 - \mu^2) \frac{K_{Ic}^2}{E}. \quad (3.9)$$

Следует учитывать, что при развитой пластичности такая оценка будет заниженной (идти в запас прочности), но это занижение может оказаться значительным, и получаемые предельные нагрузки нереалистичными. В этих условиях расчеты используются только как сравнительные.

Расчет выделения энергии выполняется методом конечных элементов путем последовательного рассмотрения двух состояний конструкции:

1. конструкция, нагруженная заданной нагрузкой и имеющая начальный трещиноподобный дефект заданной длины (рисунок 3.2); длина дефекта выбирается в соответствии с рекомендациями раздела 3.2;

2. конструкция, в которой длина дефекта получила приращение  $\Delta l$ , а перемещения границ такие же, как в состоянии 1.

Оба расчета выполняются с учетом пластичности материала, при выполнении 2-го расчета учитываются пластические деформации, вычисленные при выполнении первого. Предпочтительным способом моделирования приращения длины трещины является при этом освобождение закладываемых в модель (на этапе 1-го расчета) связей, обеспечивающих совместное деформирование берегов приращения трещины  $\Delta l$ , поскольку перестроение сетки вызывает снижение точности при переносе поля пластических деформаций, определенных в 1-м расчете, на новую сетку КЭ, используемую во 2-м расчете.

Для обоих расчетов определяется энергия  $U$  (соответственно  $U(l)$  и  $U(\Delta l)$ ) – сумма работ напряжений на деформациях по всем конечным элементам. Поскольку выбранный способ нагружения (перемещения границ в состоянии 2 равны перемещениям границ в состоянии 1) исключает работу внешних сил при переходе от состояния 1 к состоянию 2, разница энергий  $U(l + \Delta l) - U(l)$ , представляет собой энергию, которая может пойти на образование (продвижение) трещины. Расчеты величины скорости выделения энергии

$$U' = \frac{U(l+\Delta l) - U(l)}{\Delta l} . \quad (3.10)$$

выполняются для нескольких значений  $\Delta l$  с целью доказательства независимости вычисляемой величины  $U'$  от  $\Delta l$  (примечание: зависимость  $U'$  от  $\Delta l$  может проявляться как при излишне больших, так и при малых значениях  $\Delta l$  – вследствие численных ошибок при вычислении разности близких чисел  $U(l)$  и  $U(\Delta l)$ ).

Критерий обеспечения квазихрупкой прочности имеет следующий вид:

$$U' \leq G = (1 - \mu^2) \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad (3.11)$$

При сравнительном анализе лучшей считается конструкция, обладающая бóльшим значением коэффициента запаса  $n = G/U'$ , если для величины  $G$  отсутствуют прямые экспериментальные данные, то значение  $G$ , рассчитанное по формуле выше, может оказаться заниженным, и значение  $n < 1$ .

При наличии прямых данных о величине  $G$  определяется допускаемая длина трещины (дефекта)  $l$  из условия  $n \geq [n]$ . Допускаемое значение  $[n]$  может быть принято равным значению для хрупкого разрушения  $n_k = 2$  (примечание: по-видимому,  $[n]$  может быть меньше, чем  $n_k$  – за счет перераспределения напряжений при пластическом деформировании, но это требует специального исследования).

Примечание: следует учитывать, что энергетический критерий роста трещины является необходимым, но не достаточным, т.е. дает ошибку в запас прочности, величина которой не может быть определена в рамках этого подхода. С учетом этого, а также того факта, что экспериментальное определение силовых характеристик вязко-хрупкого разрушения затруднено, предлагаемый подход предпочтительно использовать для сравнительного анализа конструкций с близкими параметрами.

### 3.1.4. Прочность и долговечность при циклическом нагружении

Анализ выполняется путем расчета числа циклов нагружения, за которое длина трещины  $l$  увеличивается от начального значения (выбранного в соответствии с п. 3.2) 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). Для каждого значения  $l$  расчеты выполняются с разными значениями  $\varphi$  (п.3.2), из полученных значений выбирается наибольшее (примечание: расчеты для различных значений  $l$  могут быть сделаны независимо, без пошагового анализа траектории трещины; допускается делать расчет зависимости  $K_I(l)$  с учетом траектории трещины с помощью специализированных программ).

2. Для найденных значений  $K_I(l)$  вычисляется скорость роста трещины, затем – путем интегрирования этой зависимости – зависимость длины трещины от числа циклов. Если прямые экспериментальные данные о зависимости скорости роста трещины  $\Delta l/\Delta N$  отсутствуют, допускается применять зависимость, предлагаемую документом [4] (п. KD-430):

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = \begin{cases} CK_I^m, & K_I > K_{th} \\ 0, & K_I < K_{th} \end{cases}, \quad (3.12)$$

где для сталей с пределом текучести менее 620 МПа  $C = 4.5 \cdot 10^{-12}$  м/цикл,  $m = 3.15$  (при  $K_{Ic}$  в МПа·м<sup>1/2</sup>),  $K_{th} = 7$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

3. Расчетный ресурс определяется как разность между числом циклов до разрушения и числом циклов, соответствующим максимальной длине трещины, не обнаруживаемой применяемыми средствами дефектоскопии. Допускаемый ресурс назначается равным расчетному, деленному на коэффициент запаса по долговечности  $n_N = 10$  (такое значение запаса по долговечности предлагает документ [95]).

### 3.2. Численное моделирование прочности сварных соединений

Выполнить сравнительный анализ прочности и долговечности 2 вариантов исполнения соединения. Для этого необходимо выбрать соответствующие катеты. Для равнопрочного сварного соединения для толщины 40 мм примем по СП 16.13330.2016 катет 14 мм. Расчитаем по выражениям (3.2), (3.3) требуемый катет для сварного шва при использовании сварочных материалов с меньшей, по сравнению с основным металлом, прочностью.

$$a_2 = 14 \frac{\left(0,55 \frac{662}{1,35}\right)}{\left(0,55 \frac{556}{1,25}\right)} = 15,4 \text{ мм.} \quad (3.13)$$

- Вариант 1:  $h_1 = h_2 = 40$  мм,  $a_1 = 14$  мм, характеристики материала шва: предел текучести  $\sigma_{0,2} = 557$  МПа, предел прочности  $\sigma_g = 662$  МПа, удлинение при разрыве  $\delta = 21\%$ , ударная вязкость при температуре  $-50^\circ\text{C}$   $CV = 93$  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  $\sigma_g = 556$  МПа, удлинение при разрыве  $\delta = 28.4\%$ , ударная вязкость при температуре  $-40^\circ\text{C}$  139 Дж, при температуре  $-60^\circ\text{C}$  – 109 Дж.

Основной материал (материал фланца и ребра) в обоих случаях имеет те же характеристики, что материал варианта 1.

Расчеты выполняются для одного вида нагружения – отрыва (рисунок 3.1 а).

#### 3.2.1 Оценка хрупкого разрушения

Геометрия соединения задана в соответствии с рисунком 3.2. Значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) определялось в соответствии с п. 3.4 предлагаемой методики, для различных значений длины трещины  $l$  и угла  $\varphi$ , характеризующего положение трещины. Определение проводилось с использованием пакета ANSYS методом конечных элементов, область вершины трещины моделировалась с использованием специальных сингулярных элементов. Общий вид конечно-элементной модели в деформированном состоянии показан на рисунке 3.4.

Задача определения коэффициента интенсивности напряжений является линейной – результаты прямо пропорциональны приложенной нагрузке. Для сравнительных расчетов использовалось значение нагрузки (заданной в соответствии с рисунком 3.1 а) 100 МПа/м.

На рисунках 3.5, 3.6 приведено сопоставление коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$  для разных значений угла  $\varphi$  и разных длин трещин: 2 мм, 3, 5, 7, 8 мм. Видно, что максимальные значения  $K_I$  соответствуют  $K_{II} = 0$ , поэтому при анализе разрушения достаточно однопараметрического критерия  $K_I = K_{Ic}$ .

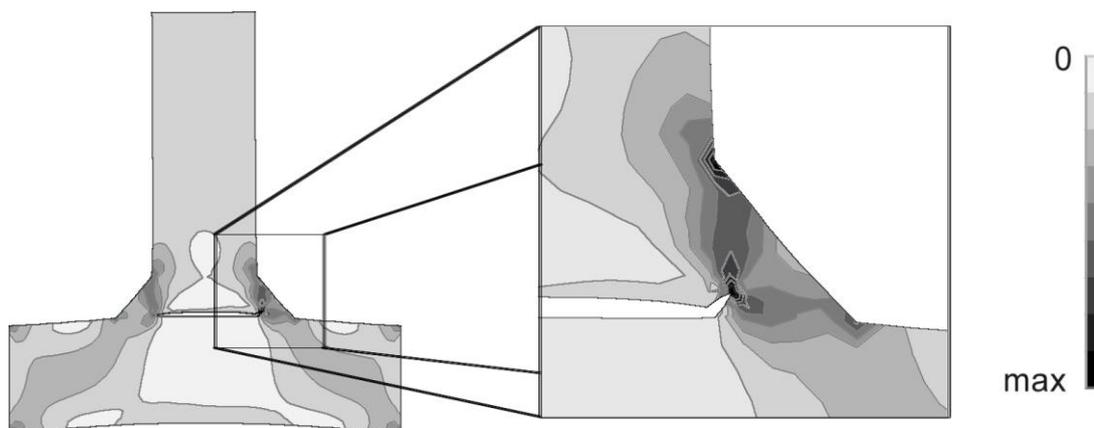


Рисунок 3.4 – Конечно-элементная модель соединения с неповаром и трещиной.

Перемещения увеличены для наглядности. Шкала – уровни эквивалентных (по Мизесу) напряжений

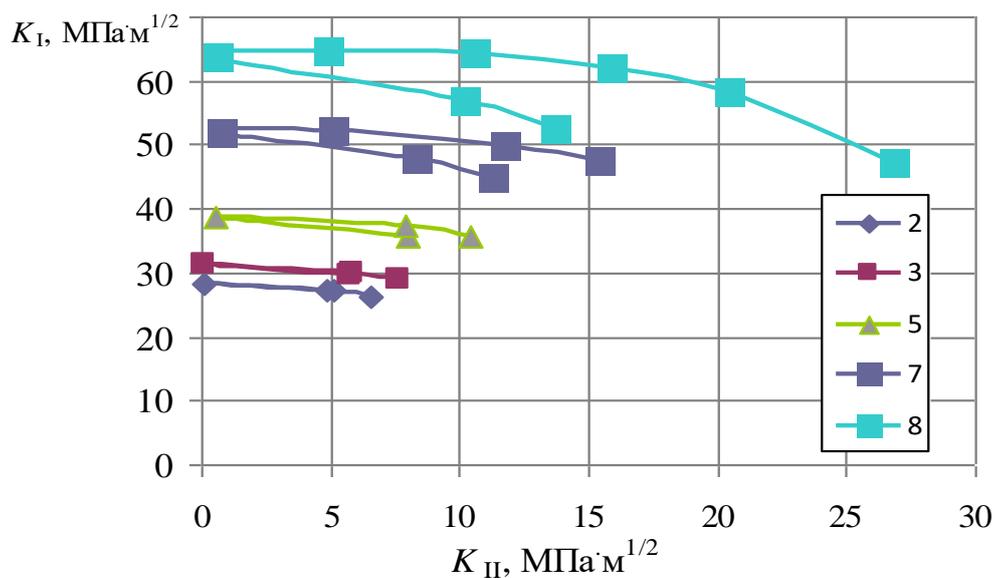


Рисунок 3.5 – КИН  $K_I$  и  $K_{II}$  для разных значений угла  $\varphi$  и разных длин трещин (2, 3, 5, 6, 8 мм)

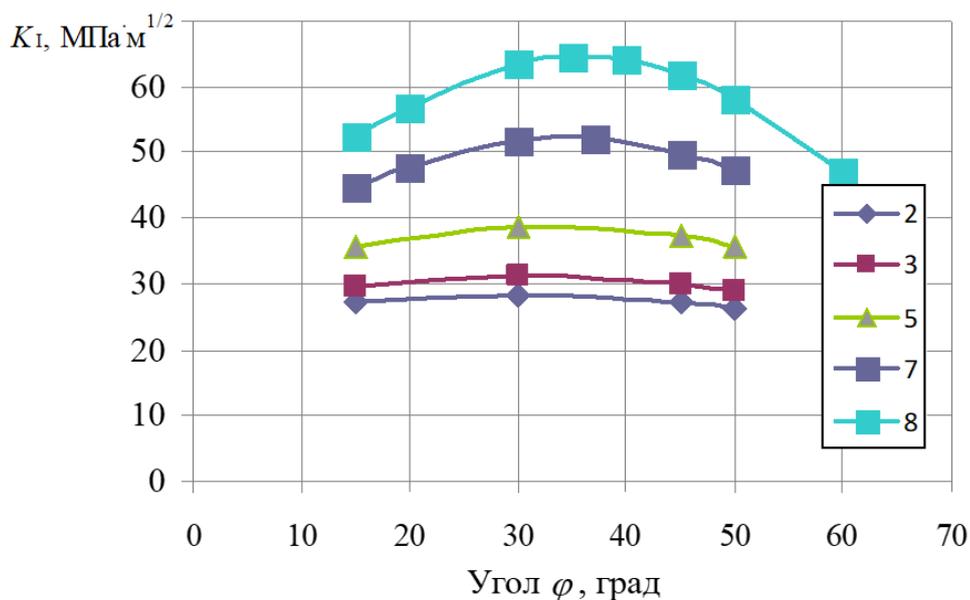


Рисунок 3.6 – КИН  $K_I$  и  $K_{II}$  для разных значений угла  $\varphi$  и разных длин трещин (2, 3, 5, 6, 8 мм)

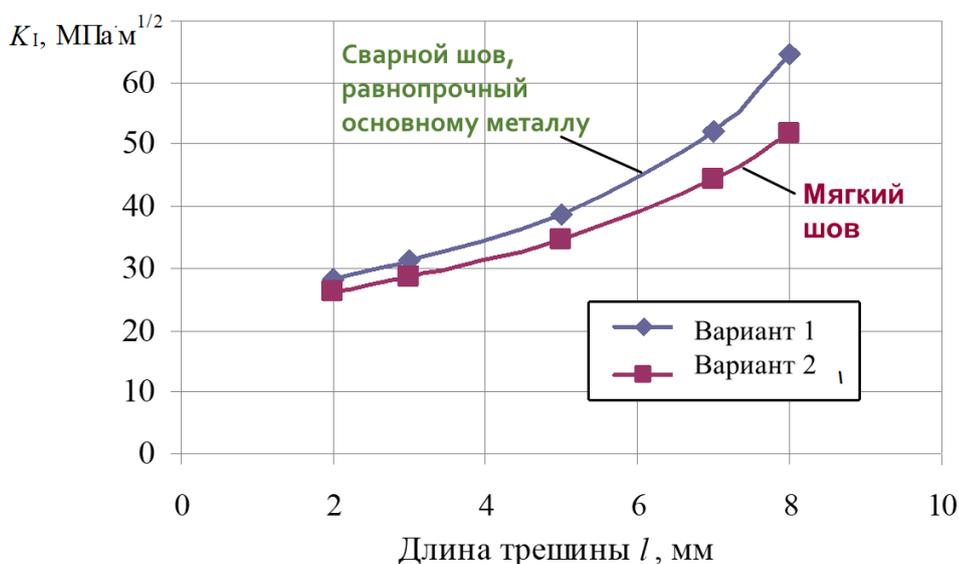


Рисунок 3.7 – Зависимость КИН от длины трещины для двух вариантов исполнения соединения

В соответствии с методикой, для каждого значения длины трещины определялась максимальная (по углу  $\varphi$ ) величина  $K_I$ . Сопоставление этих значений  $K_I$  для рассматриваемых вариантов исполнения шва приведено на рисунке 3.7. Для вари-

анта 2 (с катетом 15.3 мм) коэффициент интенсивности напряжений – при одинаковых длинах трещин – меньше на 8...20 % (большее значение соответствует большей длине трещины).

Критический коэффициент интенсивности напряжений, оцененный по пределу текучести и вязкости разрушения (формула 3.5), составляет:

- для материала, используемого в варианте 1  $K_{1c} = 176 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  при  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- для материала, используемого в варианте 2  $K_{1c} = 196 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  при  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $172 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  при  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , линейная интерполяция на  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (для сопоставимости с данными варианта 1) дает  $K_{1c} = 184 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ .

С учетом того, что  $K_{1c}$  для материала варианта 2 примерно на 5 % больше  $K_{1c}$  для материала варианта 1, запас по хрупкому разрушению для варианта 2 («мягкий» шов) на 11–23 % больше, чем для варианта 1 (большее значение соответствует большей длине трещины).

### 3.2.2. Оценка вязкого разрушения

Истинные диаграммы деформирования материалов, восстановленные по их механическим характеристикам с помощью формул, приведенных в разделе 3.5 методики, приведены на рисунке 3.8.

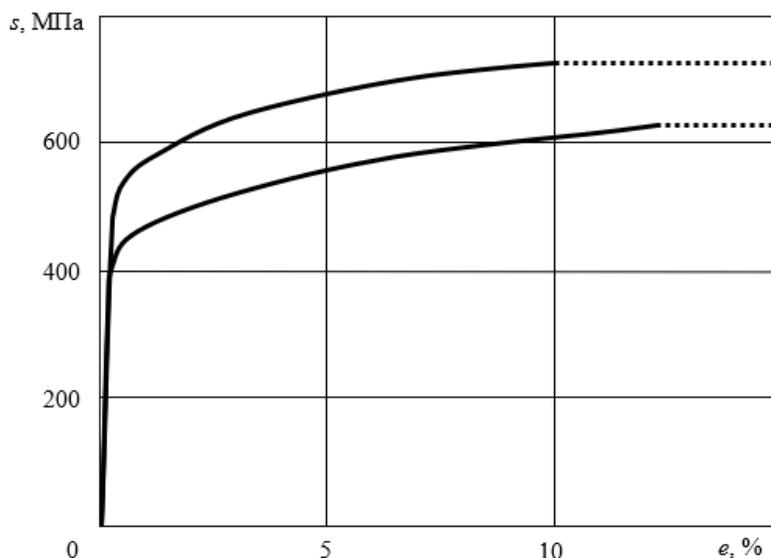


Рисунок 3.8 – Диаграммы деформирования моделируемых материалов в координатах «истинное напряжение – логарифмическая деформация»

Рассчитанные с использованием этих диаграмм зависимости «нагрузка на соединение – перемещение» приведены на рисунке 3.9.

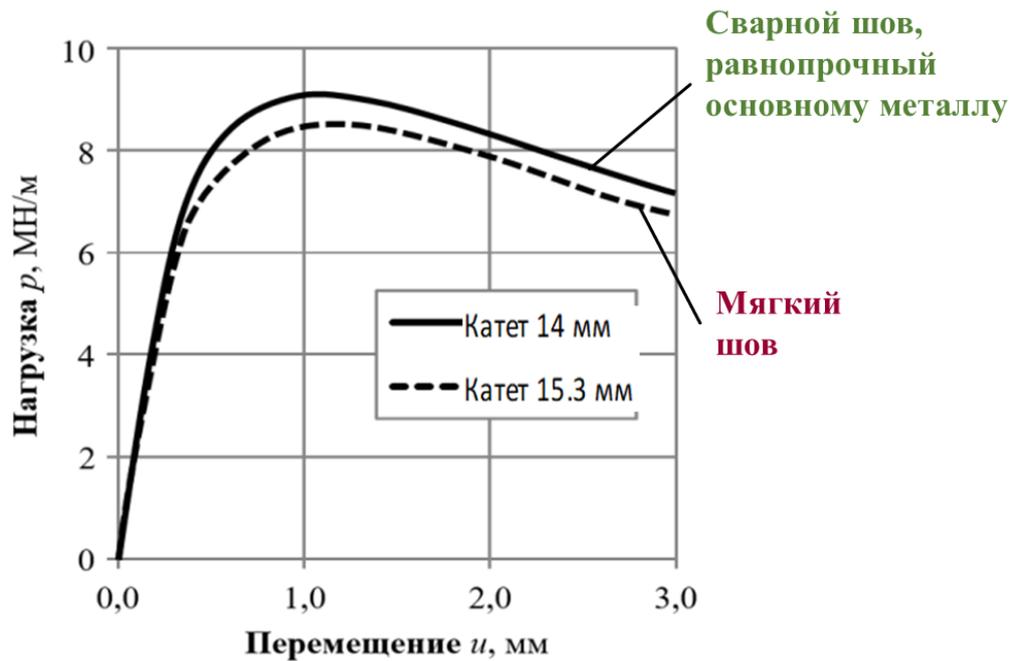


Рисунок 3.9 – Зависимость «нагрузка – перемещение» для рассмотренных вариантов конструкции

Максимальная нагрузка на соединение для варианта 1 – 9.05 МН/м, для варианта 2 – 8.52 МН/м (94 % от варианта 1). Если при использовании материала варианта 2 катет сварного шва сделать равным 16 мм, то предельная нагрузка для такого шва 8.94 МН/м, т.е. практически сравнивается с нагрузкой для варианта 1.

### 3.2.3. Оценка вязко-хрупкого разрушения

Пример результатов расчета напряженно-деформированного состояния при росте трещины (в соответствии с п. 3.6 предлагаемой методики) показан на рисунке 3.10.

Расчеты показывают, что для не слишком больших  $l$  величина  $\Delta U/l$  от  $l$  практически не зависит (что вполне ожидаемо, поскольку длина дополнительной трещины  $l$  значительно меньше размера конструктивного непровара, который, в соответствии с рисунком 3.2, принят равным  $h_1$ ). Кроме того,  $\Delta U/l$  быстро сходится по

мере измельчения сетки конечных элементов, что дает возможность использовать (для получения интегральной оценки) не слишком мелкую сетку.

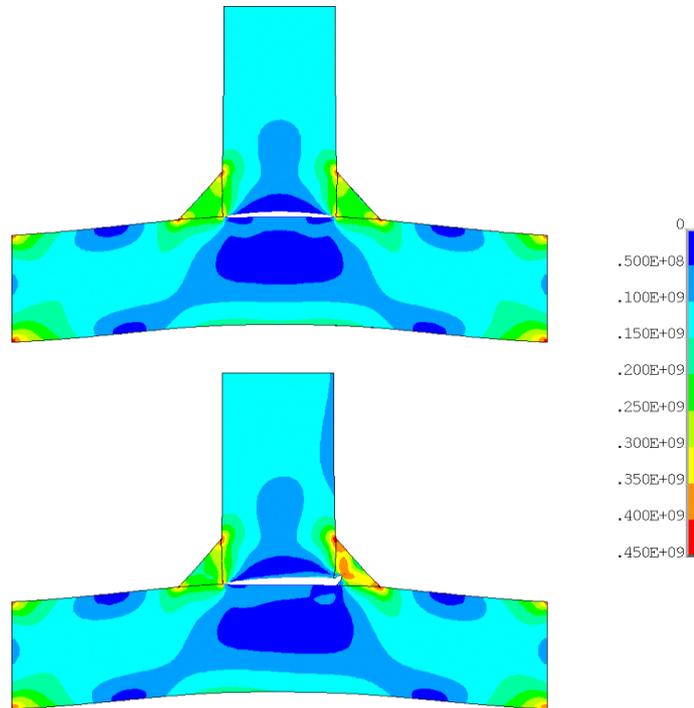


Рисунок 3.10 – Изменение напряжений при росте трещины (цветовая шкала – эквивалентные напряжения по Мизесу в Па; перемещения увеличены для наглядности)

Сопоставление величин  $\Delta U/l$  для рассматриваемых вариантов конструкции приведено на рисунке 3.11.

Зависимость  $\Delta U/l$  от уровня номинальных напряжений  $p$  в приваренном элементе соединения вызвана разными (при разных  $p$ ) пластическими деформациями вблизи концентраторов напряжения.

Различия между зависимостями  $\Delta U/l(p)$  для разных вариантов исполнения соединения, как видно из графика, невелики – сила, движущая трещину, оказывается примерно одной и той же. С учетом того, что вязкость разрушения материала для варианта 2 примерно на 5 % больше, чем для варианта 1 (и соответствующая энергия разрушения – п. 3.6 методики – тоже больше), можно считать, что запас по вязко-хрупкому разрушению у этих конструкций примерно одинаков.

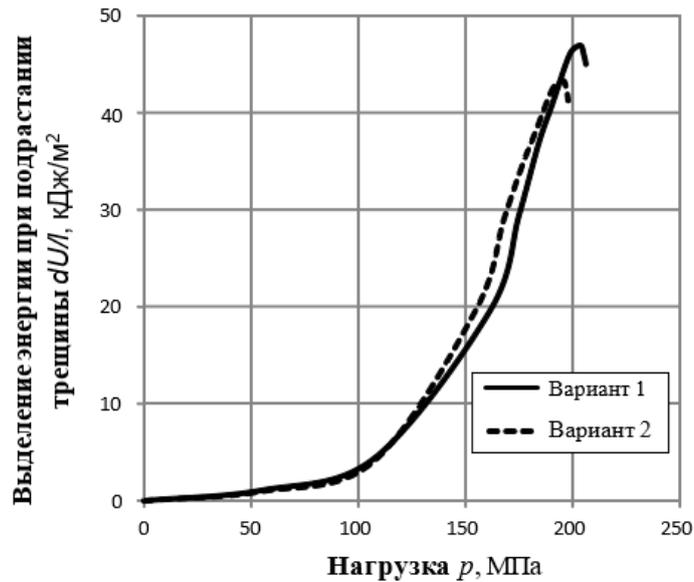


Рисунок 3.11 – Выделение энергии при подрастании трещины (соединение нагружено внешней нагрузкой)

Кроме внешней нагрузки, сварной шов нагружен остаточными сварочными напряжениями. Оценка влияния этого фактора проводилась по методике, аналогичной использованной для оценки влияния внешней нагрузки: для выбранного уровня усадки вычислялись напряжения и связанная с ними энергия, затем выполнялось приращение трещины и расчет энергии в состоянии с трещиной. Разность этих энергий, отнесенная к площади новой поверхности, возникающей при росте трещины, на рисунке 3.12 обозначена буквой  $\Gamma$ .

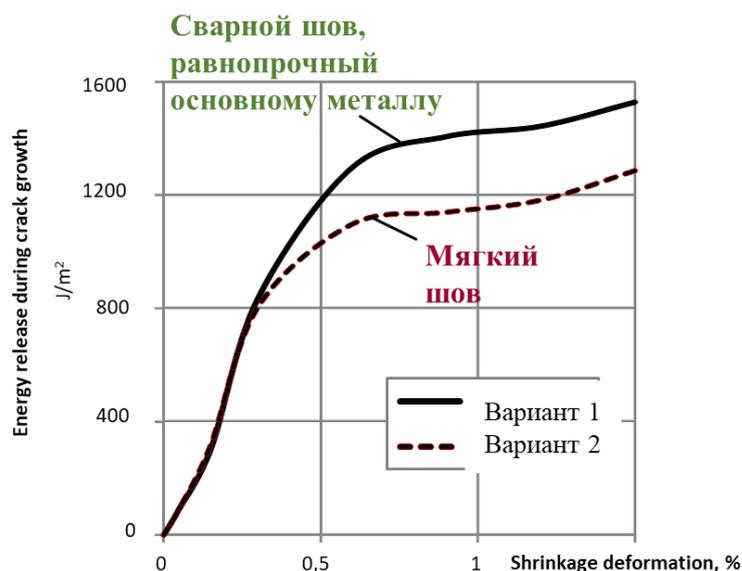


Рисунок 3.12 – Выделение энергии при подрастании трещины (соединение нагружено остаточными напряжениями)

В качестве ориентира, по-видимому, можно принять остаточные напряжения, образующиеся при охлаждении металла шва с температуры 600 °С, на более высоких температурах ползучесть материала шва приводит к быстрой релаксации напряжений. При усадке, соответствующей охлаждению с температуры 600 °С (деформация усадки около 1 %), выделение энергии при росте трещины для «мягкого» шва (вариант 2) составляет 81 % от выделения энергии для «прочного» шва. Сила, движущая трещину, оказывается меньше – за счет меньших напряжений и меньшего запаса энергии в материале с низким пределом текучести. Даже если принять, что сопротивление материала разрушению определяется площадью под кривой деформирования (рисунок 3.8), то вариант 2 оказывается предпочтительнее: площадь под кривой для него составляет 93 % от площади под кривой для более прочного материала, в то время как сила, движущая трещину, – всего 81 %; т.е. соотношение «сопротивление – сила» оказывается более предпочтительным для шва из «мягкого» материала. (Как отмечено выше, диаграммы рисунка 3.8 восстановлены по данным, учитывающим пластичность материала лишь косвенно; окончательный ответ может дать только эксперимент, но расчеты подтверждают возможную полезность исполнения шва из «мягкого» материала).

#### **3.2.4. Прочность и долговечность при циклическом нагружении**

Меньшие значения коэффициента интенсивности напряжений для варианта 2 приводят к меньшей скорости развития трещины и, соответственно, более медленному увеличению ее длины. В силу нелинейного характера зависимости скорости роста трещины с числом циклов  $\Delta l/\Delta N$  от размаха коэффициента интенсивности напряжений (т.е. от приложенной нагрузки), выигрыш в долговечности для варианта 2 зависит от уровня циклической нагрузки. Для рассмотренной в п. 3.8.2 нагрузки 100 МПа результаты приведены на рисунках 3.13 и 3.14.

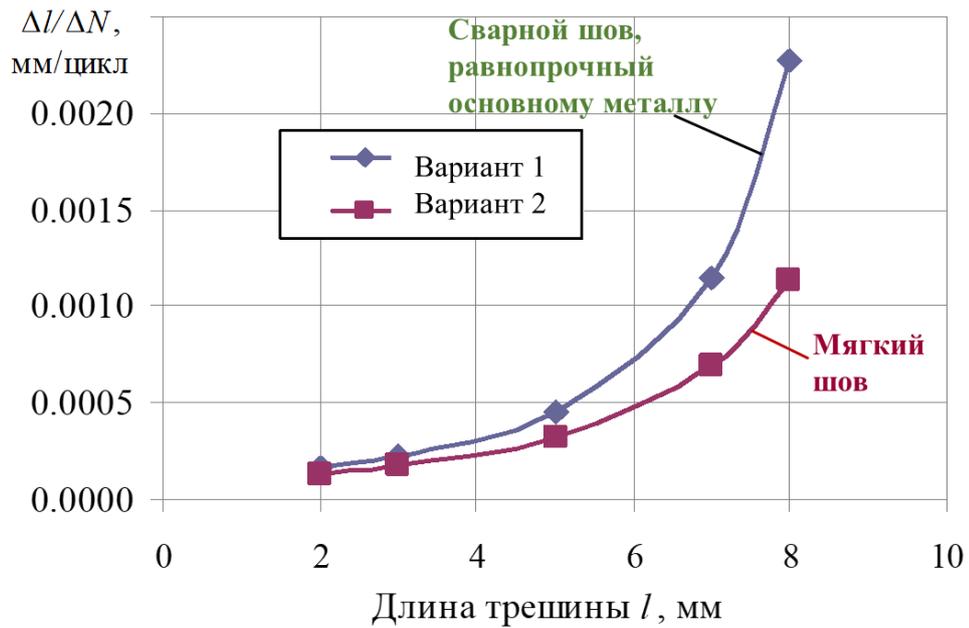


Рисунок 3.13 – Скорость роста усталостной трещины

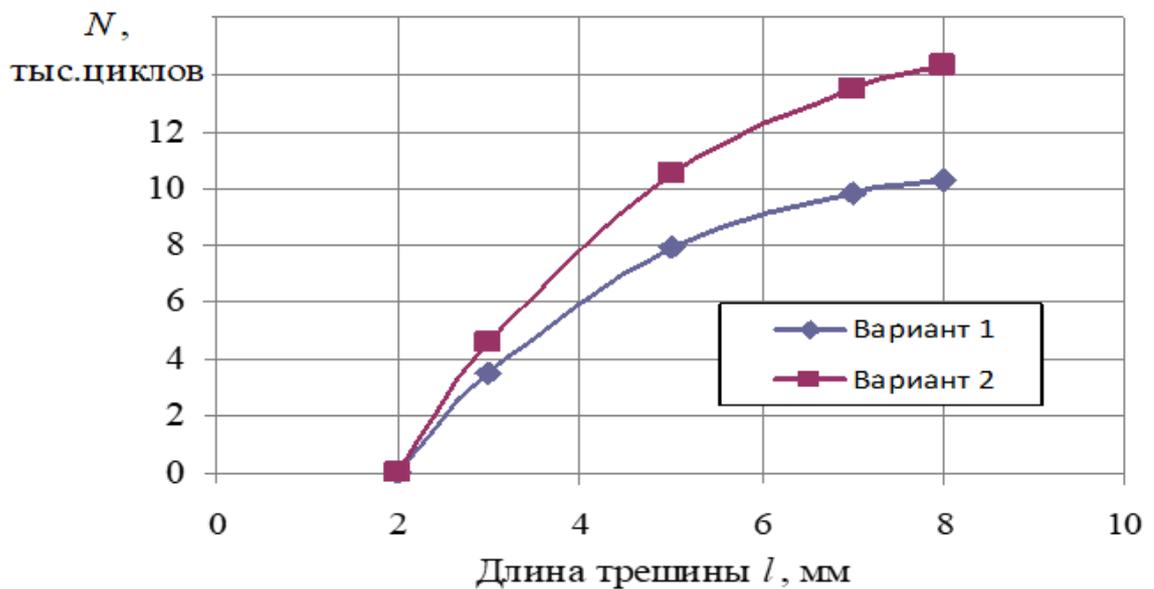


Рисунок 3.14 – Число циклов до достижения трещиной определенной длины

Выигрыш в долговечности варианта 2 по сравнению с вариантом 1 составляет примерно 40%. Для больших уровней нагрузок этот выигрыш окажется больше.

### 3.2.5 Перспективы развития предлагаемой методики

Как уже отмечалось выше при статическом нагружении сварных соединений с угловыми лобовыми швами может возникнуть вязкое квазихрупкое или хрупкое разрушение. Вязким читается разрушение, при котором к моменту начала развития трещины от вершины непровара пластическая деформация распространилась по всему опасному сечению шва и сопровождается относительным сужением площади поперечного сечения. Квазихрупким считается разрушение, при котором к моменту начала развития трещины пластическая деформация может охватить все сечение сварного шва, но при этом не наблюдается его относительное сужение. Разрушение считается хрупкими, если в момент начала разрушения наибольший размер зоны пластической деформации в окрестности вершины трещины намного меньше размера шва.

Наибольшее опасным и сложным для описания реакции сварного соединения на внешние воздействия является хрупкое разрушение. Поэтому считаю вполне перспективным продолжить развитие предлагаемой методики в части оценки хрупкой прочности сварного соединения с угловыми лобовыми швами с позиций линейной механики разрушения (далее – ЛМР).

К настоящему времени выполнено достаточно большое количество работ, направленных на получение аналитических выражений коэффициентов интенсивности напряжений для тел различных конфигураций и схем нагружения. Однако решения эти получены в основном для простых по геометрии и схеме нагружения тел с трещинами. В большинстве полученных решений напряжённое состояние вблизи вершины трещины определяется одним коэффициентом  $K_I$  (трещина нормального отрыва). Вместе с тем, для значительного числа сварных соединений напряжённое состояние вблизи вершины трещиноподобного дефекта определяется несколькими коэффициентами интенсивности напряжений. В частности, напряжённое состояние вблизи вершины непровара в тавровом соединении с лобовыми швами определяется коэффициентами  $K_I$  и  $K_{II}$  (трещина поперечного сдвига).

Рассмотрим появление коэффициента интенсивности напряжений  $K_{II}$  в случае с тавровым соединением. На рисунке 3.15 показана пластина конечных размеров с внутренней прямолинейной трещиной длиной  $2a$ , нагруженной по схеме нормального отрыва. Штриховой линией на пластине нанесён контур таврового соединения с угловыми лобовыми швами с такой же длиной непровара.

Будем различать внутреннюю и внешнюю области пластинки. Внутреннюю область составляет тавровое соединение. В рассматриваемом состоянии простого растяжения внешняя область через границу тавра действует с некоторыми силами на внутреннюю. Разумеется, такие же равные, но противоположно направленные силы действуют со стороны внутренней области на внешнюю. Эти силы становятся равными нулю, если разрезать пластинку вдоль контура тавра. Последнее эквивалентно наложению дополнительных сил со стороны внешней области на внутреннюю, дающих в сумме с указанными нуль.

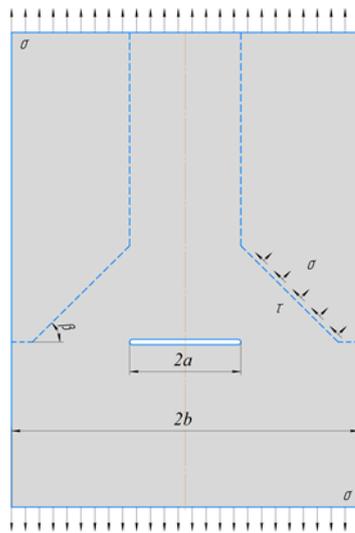


Рисунок 3.15 – К вопросу о наличии двух параметров  $K_I$  и  $K_{II}$  в тавровом соединении с угловыми лобовыми швами

На рисунке 3.15 условно показан фрагмент действия сил на часть поверхности «углового шва». В результате действия дополнительной системы сил по всему контуру, в пластине появится новое поле напряжений. Очевидно, новое поле напряжений, будучи несимметричным относительно плоскости трещины, описывается

вблизи её вершины двумя коэффициентами  $K_I$  и  $K_{II}$ . Несмотря на то, что при нагружении таврового соединения с лобовыми швами имеет место аналогия с первым типом раскрытия трещиноподобного непровара, в действительности берега непровара раскрываются по смешанному типу  $K_I$  и  $K_{II}$ . Поэтому для описания напряжённо-деформированного состояния, действующего вблизи вершины непровара таврового сварного соединения, необходимо определять значения  $K_I$  и  $K_{II}$  с учетом геометрических параметров сварного соединения с угловыми лобовыми швами.

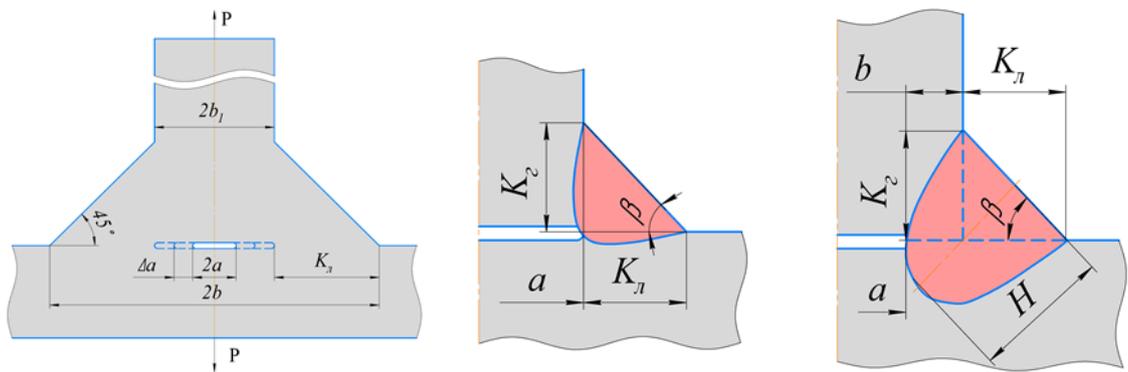


Рисунок 3.16 – Схема таврового соединения –  $a$  и характерные размеры углового шва, выполненного без проплавления –  $b$  и с проплавлением –  $в$  стенки таврового соединения

Для учета этих особенностей нами исследовано влияние на величины коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$  относительной длины непровара при соединяемой стенке тавра  $\lambda = a/(a+h+K_{л})$ , угла при вершине лобового катета  $\beta$  ( $\text{tg}\beta = K_{г}/K_{л}$ ), глубины провара стенки тавра  $h$  (рис. 3.15). Также определяли значения коэффициентов  $K_I$  и  $K_{II}$  для случаев  $\lambda = 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7$  и углов  $\beta = 30^\circ - 45^\circ - 60^\circ$  и  $75^\circ$ . Расчеты значений коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$  выполняли по формуле:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_I(\lambda, \beta), \quad (3.14)$$

$$K_{II} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f_{II}(\lambda, \beta), \quad (3.15)$$

где  $f_I(\lambda, \beta)$  и  $f_{II}(\lambda, \beta)$  – поправочные функции на конечные размеры тавров.

На рисунке 3.17 *а, б* представлены результаты определения значений поправочной функции  $f_1(\lambda, \beta)$  и отношения  $\xi = K_{II}/K_I$  для исследованных тавровых соединений с лобовыми швами различной геометрии, выполненных без проплавления стенки тавра ( $h = 0$ ).

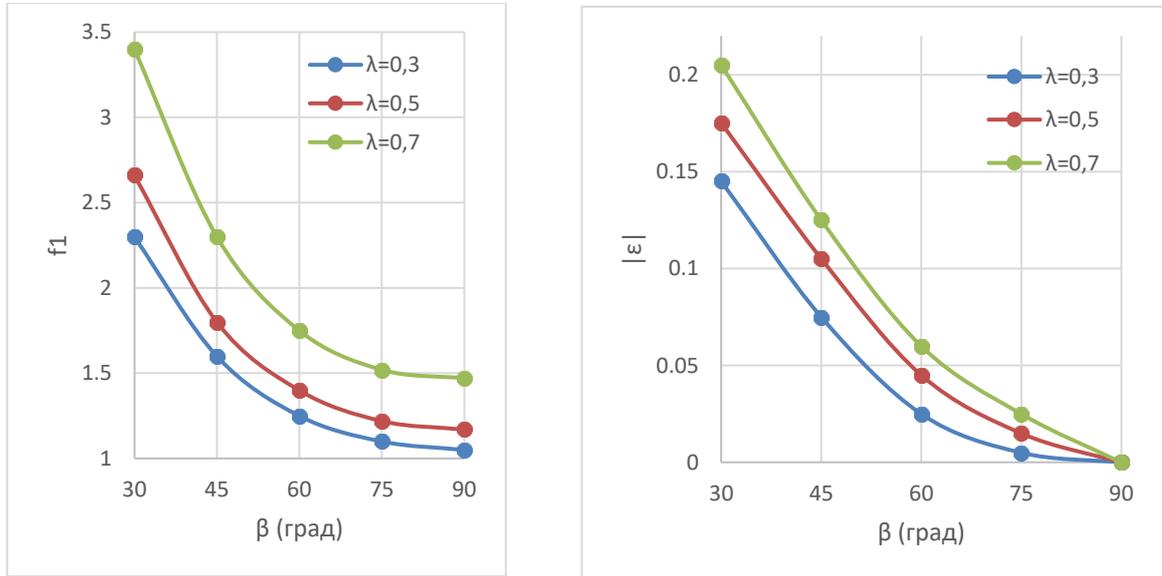


Рисунок 3. 17 – Зависимости значений поправочных функций  $f_1(\lambda, \beta)$  – а и отношений  $|\xi| = K_{II}/K_I$  – б от угла  $\beta$  и относительной длины непровара  $\lambda$

Из рисунка 3.17 следует, что значения  $\xi = K_{II}/K_I$  практически не зависят от параметра  $\lambda$ , поэтому полученные в расчётах данные удовлетворительно аппроксимируются выражением типа:

$$\xi = -0,160\beta^2 + 0,502\beta - 0,394, \quad (3.16)$$

где  $\beta$  – угол при вершине лобового катета в радианах. Заметим, что отношение  $\xi = K_{II}/K_I = f_1(\lambda, \beta)/f_{II}(\lambda, \beta)$ , поскольку принята форма записи коэффициентов  $K_I$  и  $K_{II}$  в соответствие с выражением (3.14), (3.15).

Для сварных соединений с угловыми швами, выполненными механизированными способами сварки, характерно глубокое проплавление основного металла. В результате изменяются размеры расчётных сечений швов по сравнению со сваркой без проплавления, в частности, уменьшается длина непровара  $2a$ . В рамках настоящей работы рассматривали случай, когда швы выполнены равнокатетными ( $\beta =$

45°). Характерные размеры углового шва и зоны проплавления показаны на рисунке 3.18. Как видно из рисунка, при механизированных способах сварки размер непровара уменьшается на величину  $2h$  проплавления стенки тавра, что должно привести к уменьшению значений  $K_I$  и  $K_{II}$ , по сравнению с тавровыми соединениями, выполненными с такими же катетами швов, но без проплавления стенки.

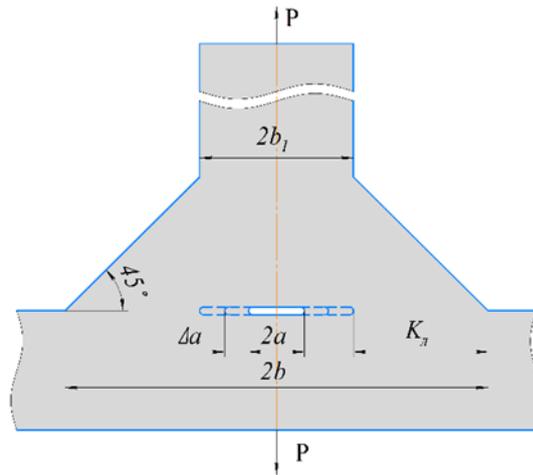


Рисунок 3.18 – Эскиз таврового соединения, выполненного с проплавлением стенки  $h$

С увеличением глубины проплавления стенки тавра  $h$ , величина поправочной функции снижается практически до значения  $f_1(\lambda, \beta, h) \sim 1,0 \div 1,25$ . Следовательно, сопротивляемость хрупкому разрушению данных тавровых соединений с увеличением глубины проплавления должна возрастать.

Для оценки сопротивляемости хрупким разрушениям сварных соединений металлических конструкций с трещиноподобными дефектами применяют подходы линейной механики разрушения, базирующиеся на концепции разрушения Гриффитса. В случае трещин смешанного типа раскрытия в практических расчётах используют различные критерии локального разрушения (КЛР), позволяющие определить значение номинального напряжения  $\sigma_n^*$  (разрушающей нагрузки  $P^*$ ) и направление угла страгивания трещины  $\theta_0$  [2, 4, 5]. В качестве расчётного применяется критерий обобщённого отрыва,  $\sigma_\theta$  – критерий, который сформулирован на основе обобщённого коэффициента интенсивности напряжений  $K_\theta(\theta)$ . Выражение для определения его значения записано в виде

$$K_{\theta}(\theta) = \frac{K_I}{4} \left( 3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} - 3\xi \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right). \quad (3.17)$$

Условие прочности записано в виде

$$K_{\theta} = K_I F_0(\xi) \leq K_{Ic}. \quad (3.18)$$

Значение номинального разрушающего напряжения  $\sigma_n^*$  в момент страгивания трещины определяют из выражения

$$\sigma_n^* = \frac{K_{Ic}}{f_I(\lambda, \beta) F_0(\xi) \sqrt{\pi a}}, \quad (3.19)$$

где  $K_{Ic}$  – вязкость разрушения металла шва;  $a$  – полудлина трещины (непровара);  $F_0(\xi) > 1,0$  – функция, зависящая от отношения  $\xi = K_{II}/K_I$ .

Таким образом, напряжённое состояние в окрестности вершины трещинообразного непровара лобового шва определяется двумя коэффициентами интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$ . Показано, что при выполнении швов без глубокого проплавления основного металла оптимальным, с точки зрения прочности в хрупком состоянии, являются швы с углом между лобовым катетом и свободной поверхностью шва  $\beta_{оп} = 60^{\circ}$ . Увеличение глубины проплавления основного металла также приводит к увеличению прочности тавровых соединений в хрупком состоянии. Из этого следует, что развитие предлагаемой в работе методике является актуальным и перспективным с точки зрения конструктивно-технологической оптимизации сварных соединений с угловыми швами.

### 3.3. Выводы по главе 3

1. Разработана методика расчетной оценки конструкционной прочности таврового сварного соединения с непроваром, которая позволяет провести ранжирование ряда альтернатив его исполнения из условия сопротивления вязкому, квазхрупкому, хрупкому и усталостному разрушению.

2. Выполненные по предлагаемой методике расчеты двух вариантов таврового сварного соединения типа ТЗ: с равнопрочным (вариант 1) и «мягким» (вариант 2) сварными швами – показали, что:

- запас по хрупкому разрушению для варианта 2 на 11–23 % больше, чем для варианта 1;

- максимальная нагрузка на соединение для варианта 2 составляет 94 % от такой 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 примерно 40 %.

3. Использование «мягких» сварных швов для тавровых соединений высокопрочных сталей, склонных к образованию холодных трещин, позволяет решать задачи по обеспечению их технологической и конструкционной прочности. По всей видимости, с увеличением класса прочности свариваемых сталей положительный эффект от применения «мягких» сварных швов будет только увеличиваться.

## **4. РАЗРАБОТКА И ОПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОДОБРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ С ОЦЕНКОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН**

### **4.1. Методика одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей с оценкой сопротивления сварного соединения образованию холодных трещин**

Испытания по определению сопротивляемости основного и сварочного материалов появлению холодных трещин проводятся на пробах «Тэккен».

Установим количество проб «Тэккен», которые следует применять при одобрении технологии сварки:

– Согласно ГОСТ 17642-2 рекомендуется применять одну пробу «Тэккен» для автоматической сварки при использовании самозащитной порошковой проволоки, а также в среде защитных газов;

– Для ручной сварки покрытыми электродами, механизированной сваркой в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты) установим две пробы, чтобы исключить влияние «человеческого» фактора и мастерства сварщика, а также в связи с тем, что при сварке РДС затруднительно контролировать погонную энергию сварки.

Контрольные образцы испытываемого материала должны быть вырезаны механическим способом (пилой, фрезой или отрезным кругом) с последующей обработкой свариваемых кромок фрезерованием или шлифованием с шероховатостью не более Rz 80.

Подготовка сварочных материалов (электродов, флюсов, сварочных газов) должна выполняться в соответствии с рекомендациями их производителя [24]. Крепежные сварные швы рекомендуется выполнять теми же проволоками или электродами, которые будут применяться при контрольной сварке. Сварку крепежных швов производить на режимах, рекомендованных производителем сварочных

материалов, или в интервале от 10 до 15 кДж/см. Допускается для сварки крепежных швов применять проволоки или электроды, которые имеют предел текучести равный или меньший на 25%, чем основной металл.

После выполнения крепежных швов необходимо их охладить до температуры окружающего воздуха и проверить наличие поверхностных трещин согласно визуальным методом контроля по ИСО 17637 (класс контроля не регламентируется).

Режимы сварки должны быть выбраны из заявленной пСПС, причем из интервала погонных энергий следует выбирать меньше значение, как наиболее опасное с позиции образования холодных трещин, так как способствует появлению закалочных структур за счет высоких скоростей охлаждения.

Для обоснования использования пониженных погонных энергий проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены ниже в разделе по апробации разработанной методики.

Если в соответствии с технологической документацией сварка выполняется с предварительным подогревом, то контрольный образец перед сваркой помещают в печь для равномерного прогрева его по всему сечению.

Если технологическим регламентом предусмотрен послесварочный нагрев или термическая обработка изделия, контрольный образец переносят в печь сразу после наплавки испытываемого шва.

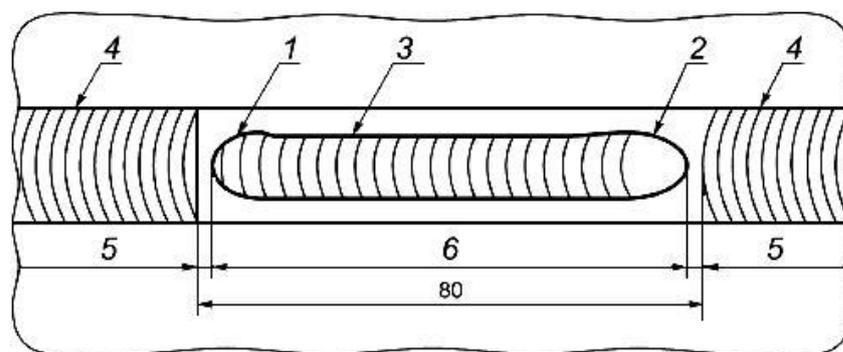


Рисунок 4.1 – Схема сварки пробы «Тэккен»:

- 1 – начало шва; 2 – окончание сварного шва; 3 – испытываемый сварной шов;
- 4 – крепежный сварной шов; 5 – размер, равный приблизительно 2 мм;
- 6 – размер, равный приблизительно 76 мм

После завершения сварочных работ при температуре окружающего воздуха (среды) следует образец выдержать двое суток (48 часов) после чего разрешается проведение визуального контроля поверхностных трещин. Температуру окружающей среды следует внести в пСПС.

Поверхностные трещины должны быть проверены визуальным контролем. Если они будут обнаружены, то дальнейшие работы не проводятся, и проба бракуется. Необходимо будет заявителю вносить изменения в заявленный интервал погонных энергий. Если визуально трещин не видно, то испытание продолжается на 4-х контрольных образцах, вырезанных из пробы по схеме, приведенной на рисунке 4.2.

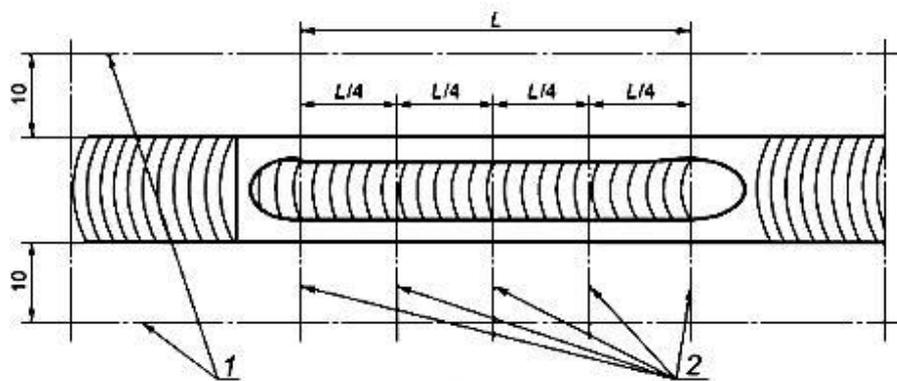


Рисунок 4.2 – Схема вырезки образцов и проверяемого сечения:

1 – резка в направлении ширины образца; 2 – положение проверяемого сечения

Визуальный и измерительный контроль проводят на протравленных образцах сварного соединения. При проведении ВИК возможны следующие варианты:

1 – испытание считается положительным, если трещин на образцах не выявлено;

2 – испытание считается положительным, если на образцах обнаружены трещины размером не более 0,5 мм;

3 – испытание считается неудовлетворительным, если на образцах обнаружены трещины размером более 0,5 мм.

Если испытание будет признано не успешным, то следует откорректировать пСПС путем внесения требований по предварительному подогреву, изменению погонной энергии, применению сварочных проволок с меньшим пределом текучести.

При внесении изменений в технологию сварки необходимо провести повторные испытания.

При выборе температуры подогрева, следует руководствоваться:

- 1) таблицей 4.1, соответствующей ранее действующим рекомендациям РС НД N2-030101-015 [94];
- 2) рекомендациями по сварке Британского стандарта EN 1011-2 [12].

Таблица 4.1 – Требования к подогреву при сварке сталей высокой прочности

Категория свариваемой стали	Толщина металла, мм	Температура окружающего воздуха, °С	Содержание диффузионного водорода в напл. металле, см <sup>3</sup> /100 г	Минимальная температура подогрева, °С	
(A/F) 690	До 130	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)	80	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100	
		От 0 до -10	До 3,0 (НЗ)	120	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	130	
		От -11 до -15	До 3,0 (НЗ)	Предмет специального рассмотрения Регистром	
		(A/F) 620 и (A/F) 550	До 40	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)
Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	60				
От 0 до -15	До 3,0 (НЗ)			80	
	Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)			100	
От -16 до -20	До 3,0 (НЗ)			Предмет специального рассмотрения Регистром	
41 – 100	От 0 и выше			До 3,0 (НЗ)	60
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100	
	От 0 до -15		До 3,0 (НЗ)	120	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	120	
	От -16 до -20		До 3,0 (НЗ)	Предмет специального рассмотрения Регистром	
	(A/F) 500		До 40 вкл.	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)
Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)					40
Свыше 5,0 до 10,0 (Н10)		60			
Ниже 0 до -15		До 3,0 (НЗ)		60	
		Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)		80	
Ниже -15 до -20		До 3,0 (НЗ)		100	
Св. 40 до 100 вкл.		От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)	60	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	80	
		Ниже 0 до -15	До 3,0 (НЗ)	80	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100	
		Ниже -15 до -20	До 3,0 (НЗ)	Предмет специального рассмотрения Регистром	

При назначении температуры предварительного подогрева по приведенным рекомендациям из двух температур выбирается наименьшая. При получении отрицательного результата (трещины в пробе) необходимо увеличивать температуру предварительного подогрева вплоть до межваликовой температуры в соответствии с пСПС. Следует отметить, что в рекомендациях EN 1011-2 [12] учтено влияние на температуру подогрева ( $T_p$ ) химического состава (СЕТ), толщины пластины ( $d$ ), содержания диффузионного водорода в металле сварного шва ( $H_D$ ) и погонной энергии сварки ( $Q$ ) в следующей формуле (1.3).

Предложения по совершенствованию разделов части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» представлены в Приложении А.

На основании разработанной методики была проведена её апробация в соответствии с программой испытаний (приведена в Приложении Б).

Результаты испытаний следует распространять на толщины от фактически испытанной на пробе «Тэккен» – до 3 мм.

#### **4.2. Апробация методики одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей с оценкой сопротивления образованию холодных трещин**

В настоящем разделе приведены результаты испытаний по оценке влияния предела текучести сварочной проволоки на появление холодных трещин. Испытания проводились на стали PCE500TM толщиной 25,8 мм (таблица 4.2 и 4.3).

Таблица 4.2 – Химический состав исследуемой стали

Толщина	Массовая доля химических элементов в пробе, %											
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Al	S	P
25,8	0,064	1,51	0,339	0,021	0,174	0,21	0,032	0,0039	0,05	0,027	0,0006	0,013

Таблица 4.3 – Покатели механических свойств стали толщиной 25,8 мм

Временное сопротивление стали, МПа	Предел текучести стали, МПа	Относительное удлинение стали, %	Ударная вязкость стали, Дж/см <sup>2</sup>		СЕТ, %, не более
			KCU <sup>-60</sup>	KCV <sup>-40</sup>	
630	520	22	–	419	0,37

В качестве сварочных материалов (см. таблицу 4.4) были использованы порошковые проволоки диаметром 1,2 мм марок KOBELCO DW-A70L; KOBELCO DW-A65L; ESAB FILARC PZ6115; ESAB FILARC PZ6125. Сварка выполняли в среде защитных газов K18 сварочным роботом FANUC ARC Mate 120iC на погонной энергии  $7\pm 0,5$  кДж/см. Выбор низких значений погонной энергии обусловлен необходимостью создания жестких условий охлаждения наплавленного металла. Все работы были проведены в присутствии представителя Главного Управления Российского морского регистра судоходства, для чего разработана методика проведения испытаний (Приложение А) и по итогам составлены протоколы испытаний (Приложение Б).

Таблица 4.4 – Показатели механических свойств наплавленного металла

Предел текучести наплавленного металла, МПа	Предел прочности наплавленного металла, МПа	Относительное удлинение наплавленного металла, %
15	654	
62	557	
56	445	

До начала выполнения сварочных работ был проведен 100%-ный измерительный контроль сборочных деталей проб «Тэккен», результаты которого подтвердили соответствие их размеров нормативным требованиям (таблицы 4.5, 4.6).

После проведения измерительного контроля детали пробы передавались на рабочий стол, где производилась их сборка и сварка крепежных швов. При сборке деталей под сварку зазор  $g$  принимался равным 2,5 мм, т.к. в процессе наложения крепежных швов возникают усадочные сварочные деформации, и величина зазора  $g$  уменьшается до заданной величины.

Таблица 4.5 – Нормативные значения параметров сборочных деталей пробы «Тэккен»

Длина, мм	Ширина, мм		Толщина, мм	Угол, град.	Шероховатость
	по А-А	по Б-Б			
200±2	75±2	82,5±2	25,8±0,9	30±2 <sup>0</sup>	Не более Rz80

Таблица 4.6 – Фактические значения параметров сборочных деталей проб «Тэккен»

Маркировка детали	Значения параметров					
	Длина, мм	Ширина, мм		Толщина, мм	Угол, град.	Шероховатость
		по А-А	Б-Б			
1-1	201	74,3	–	26,0	30	Не более Rz40
1-2	201	75,2	82,4	25,7	30	Не более Rz40
2-1	201	75,0	–	25,6	30	Не более Rz40
2-2	199	75,3	82,6	25,7	30	Не более Rz40
3-1	201	75,0	–	25,5	30	Не более Rz40
3-2	201	75,1	82,4	25,7	30	Не более Rz40
4-1	201	75,1	–	25,6	30	Не более Rz40
4-2	201	77,8	82,2	25,7	30	Не более Rz40

В собранных под сварку испытуемого шва пробах (рисунок 4.3) измеряли зазор  $g$  и габаритные размеры пробы, средние значения которых свидетельствуют, что все контролируемые параметры соответствуют нормативным требованиям (таблицы 4.7, 4.8).

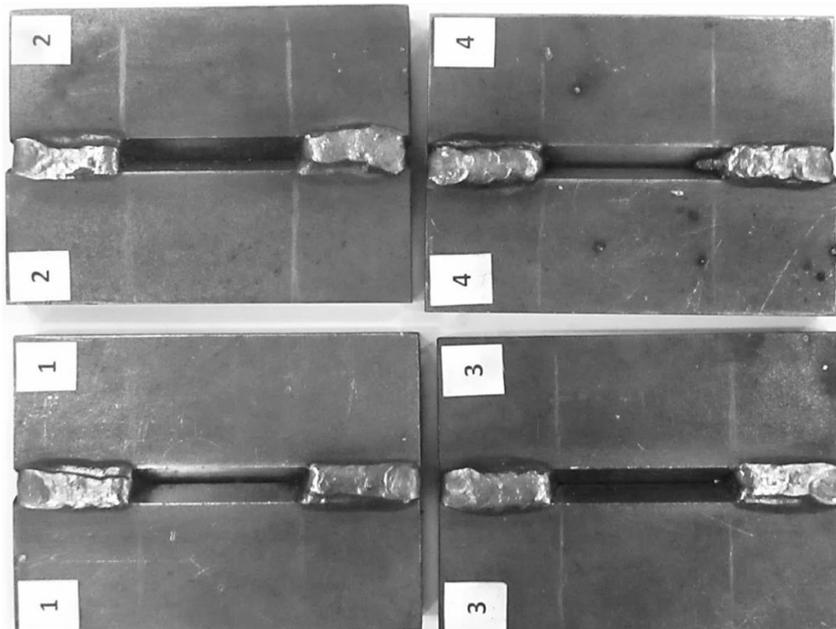


Рисунок 4.3 – Фотографии проб «Тэккен», собранных под сварку испытуемого сварного шва

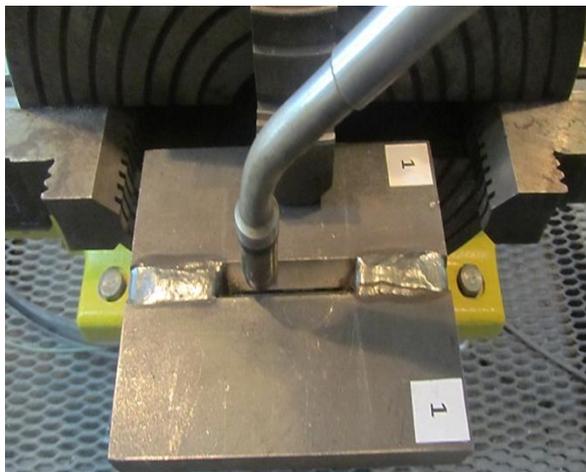
Таблица 4.7 – Результаты измерений величины зазора

Маркировка пробы	Величина зазора в месте наложения испытуемого сварного шва, мм				
	По левому краю	В середине	По правому краю	Среднее значение	Нормативное значение
1	1,9	2,0	2,3	2,07	2±0,2
2	2,1	2,3	2,0	2,13	
3	1,9	1,9	1,8	1,87	
4	2,0	2,0	2,0	2,0	

Таблица 4.8 – Результаты измерений габаритных размеров проб «Тэккен»

Маркировка пробы	Ширина пробы, мм		Длина пробы, мм	
	измеренная	нормаивная	измеренная	нормативная
1	151	150±2	201	200±2
2	152		200	
3	151		201	
4	151		200	

Готовые для сварки пробы поочередно устанавливались в позиционер сварочного робота FANUC ARC Mate 120iC, после чего проводилось его программирование и проверка перемещения горелки в процессе отработки технологии сварки (рисунок 4.4). Затем проводилась сварка испытуемого шва (рисунок 4.4) на режимах, приведенных в таблице 4.9.



а)



б)

Рисунок 4.4 – Проверка позиционирования сварочной горелки робота FANUC ARC Mate 120iC на пробе «Тэккен»

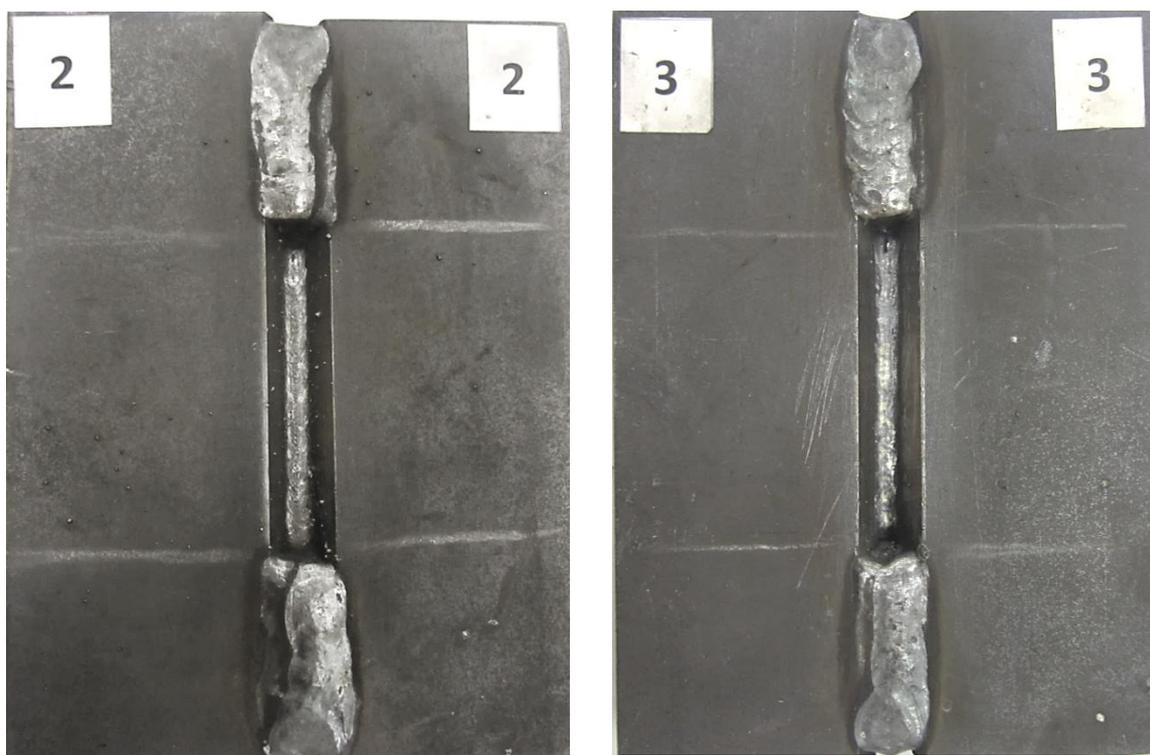


Рисунок 4.5 – Фотографии готовых к испытаниям проб Тэкенн

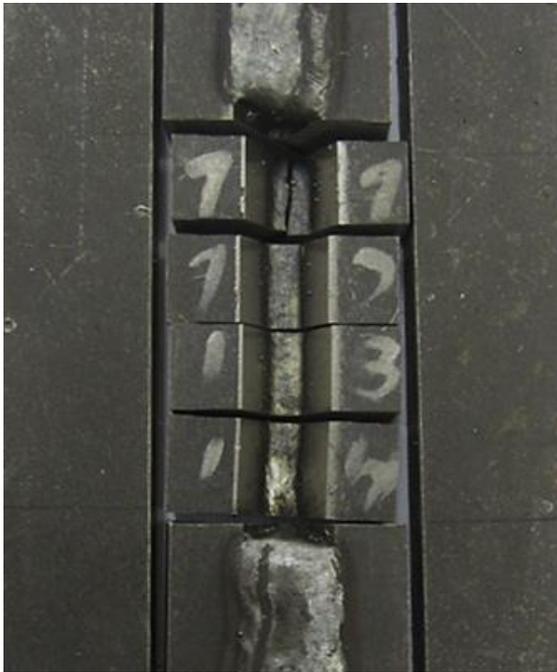
Таблица 4.9 – Параметры режимов сварки испытываемых швов

Маркировка пробы	Параметры режима сварки				
	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки см/с	Погонная энергия кДж/см	
				фактическая	нормативная
1	173	22,8	0,567	6,957	7±0,5 кДж/см
2	170	22,9	0,567	6,866	
3	174	22,9	0,567	7,028	
4	170	22,8	0,567	6,836	

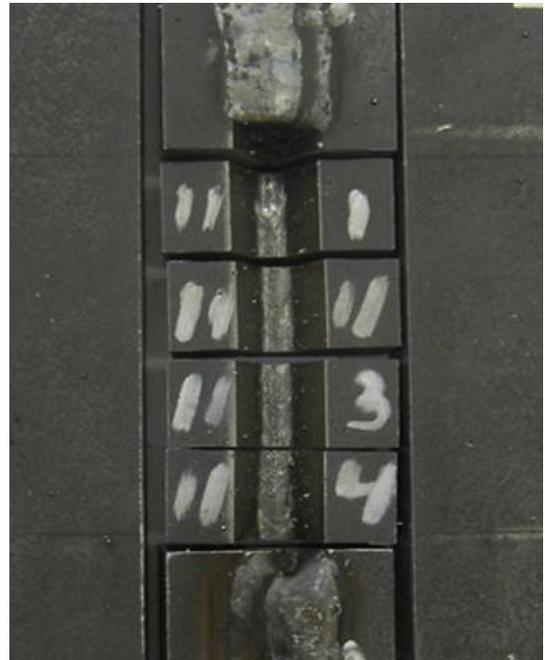
Примечания. 1. Испытуемый шов пробы №1 заварен проволокой KOBELCO DW-A70L, шов №2 – ESAB FILARC PZ6125, шов №3 – KOBELCO DW-A65L, шов №4 – ESAB FILARC PZ6115.  
2. Погонная энергия рассчитывалась без учета КПД.

По прошествии 48 часов был проведен визуальный контроль испытываемых сварных швов на наличие трещин. В результате проведенного контроля было установлено, что в пробе № 1 (рисунок 4.6 а), заваренной проволокой KOBELCO DW-A70L с пределом текучести 668 МПа, имеется поверхностная трещина протяженностью 8 мм. В остальных сварных швах проб поверхностных трещин не обнаружено. Для

выявления трещин, не вышедших на поверхность сварного шва, все пробы «Тэккен» были разрезаны на контрольные образцы (рисунок 4.6), поперечные сечения которых подлежат исследованию с помощью микроскопа с кратностью увеличения не менее  $\times 50$ .



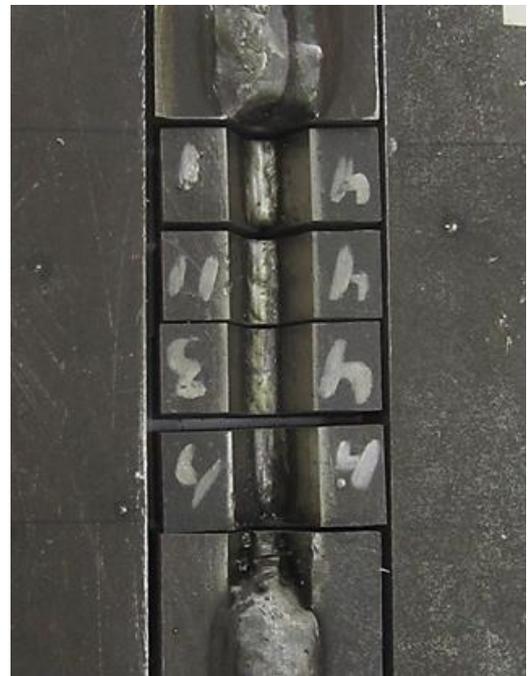
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.6 – Фотографии вырезки контрольных образцов (темплетов) из проб «Тэккен»

Для проведения этих исследований поверхности контрольных образцов были шлифованы и отполированы в соответствии с требованиями BS EN 1321:1997, а затем протравлены 10%-ным раствором азотной кислоты (рисунок 4.7).

Осмотр подготовленных образцов проводится с помощью оптического микроскопа Axio Observer D1.m, оснащенного программно-аппаратным комплексом для анализа изображений Thixomet Pro с увеличением не менее  $\times 50$ . Окончательный вывод об отсутствии трещин в сварном шве делали после изучения его поперечного сечения при увеличении не менее  $\times 200$ . Результаты измерений приведены в таблице 4.10 и на рисунках 4.8–4.13.

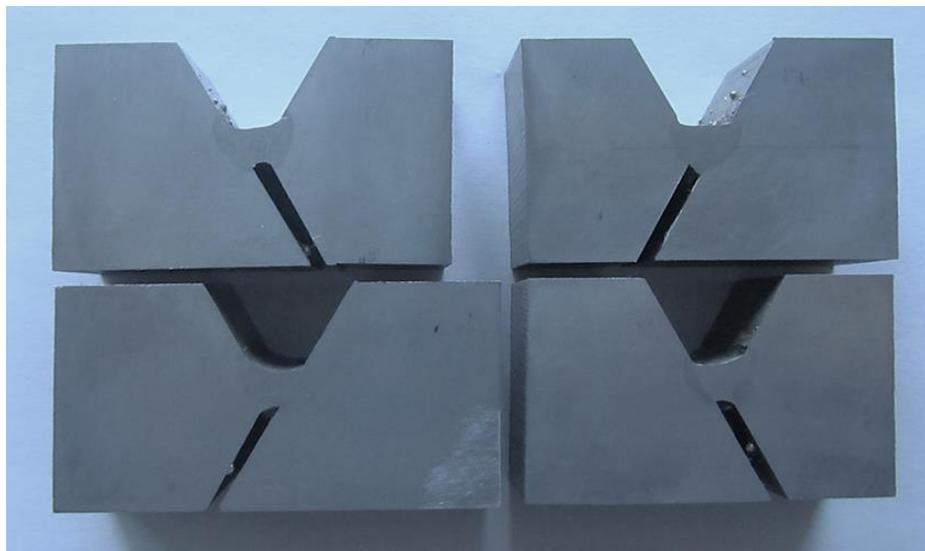


Рисунок 4.7 – Фотографии поперечных сечений контрольных образцов проб «Тэккен» № 1–4

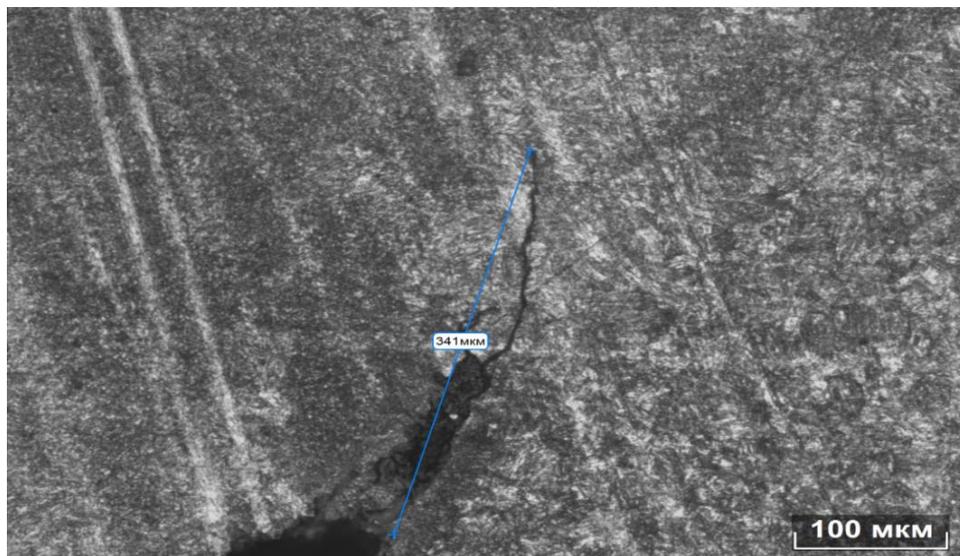


Рисунок 4.8 – Макрошлиф контрольного образца № 1-3

Таблица 4.10 – Результаты визуального и измерительного контроля испытываемых сварных швов проб «Тэккен»

Номер пробы	Номер образца	Поверхностная трещина	Корневая трещина
1 KOBELCO DW- A70L $\sigma_T = 668$	1-1	Есть	Есть
	1-2	Нет	Есть
	1-3	Нет	Нет
	1-4	Нет	Есть
2 ESAB FILARC PZ6125 $\sigma_T = 445$	2-1	Нет	Нет
	2-2	Нет	Нет
	2-3	Нет	Нет
	2-4	Нет	Нет
3 KOBELCO DW- A65L $\sigma_T = 654$	3-1	Нет	Нет
	3-2	Нет	Нет
	3-3	Нет	Нет
	3-4	Нет	Есть
4 ESAB FILARC PZ6115. $\sigma_T = 557$	4-1	Нет	Нет
	4-2	Нет	Нет
	4-3	Нет	Нет
	4-4	Нет	Нет



Рисунок 4.10 – Макрошлиф контрольного образца № 1–2



Рисунок 4.11 – Макрошлиф контрольного образца № 1–4

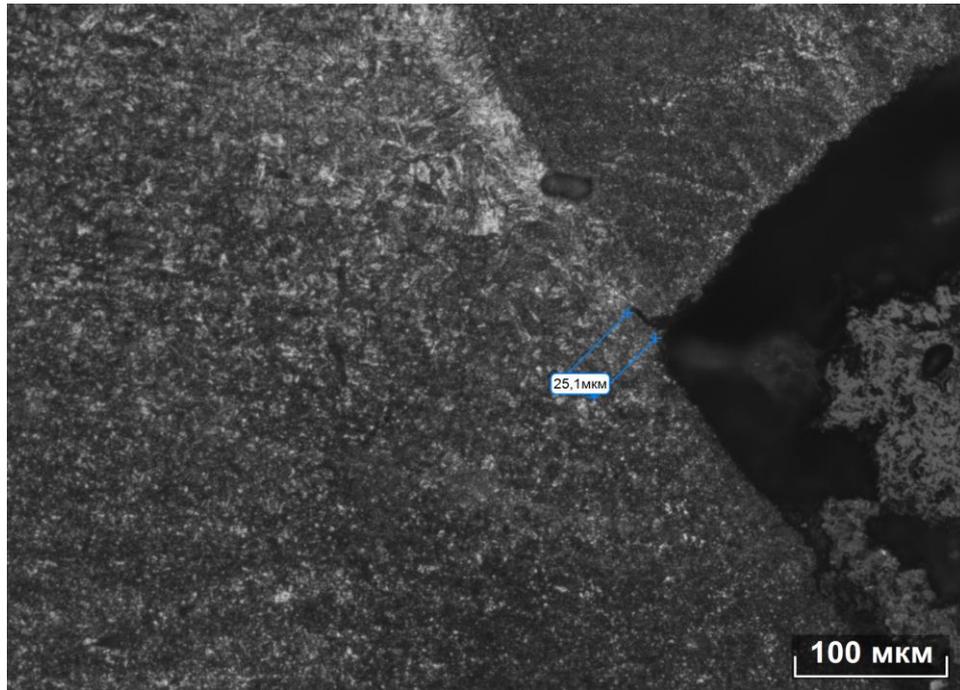


Рисунок 4.10 – Макрошлиф контрольного образца № 1-4

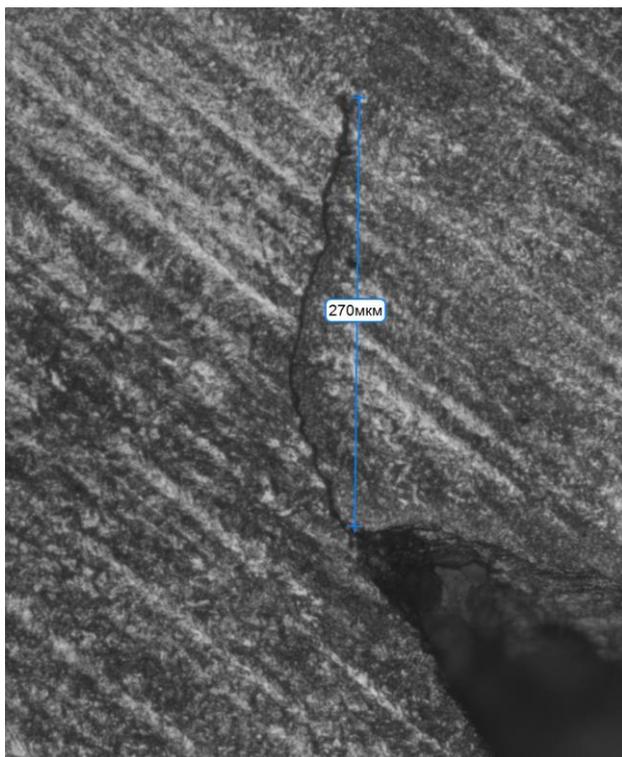


Рисунок 4.12 – Макрошлиф контрольного образца № 3-2



Рисунок 4.13 – Макрошлиф контрольного образца № 3-4

Из полученных результатов следует (таблица 4.10), что пробы № 1 и № 3 дали неудовлетворительный результат, т.к. в них были обнаружены длиной более 0,5 мм

трещины. В частности, в контрольном образце № 1-1 была выявлена трещина, которая привела к разрушению образца на две части (рисунок 4.6 а), а в двух других контрольных образцах пробы № 1 были выявлены корневые трещины, распространившиеся на всю высоту сечения испытываемого сварного шва (рисунки 4.9, 4.10).

Пробы, давшие неудовлетворительный результат, были заварены сварочной проволокой с пределом текучести 654–668 МПа. Причем в пробе № 1, заваренной проволокой KOBELCO DW-A70L с пределом текучести 668 МПа, корневая трещина распространилась практически на всю длину испытываемого сварного шва.

Пробы, давшие положительный результат, были заварены проволоками ESAB FILARC PZ6115 и FILARC PZ6125 с пределом текучести 445–557 МПа, что подтверждает ранее высказанное предположение о целесообразности выполнения корневых проходов в сварных соединениях высокопрочных марок сталей «мягкими» сварными швами.



Рисунок 4.14 – Схема проведения одобрения технологии сварки высокопрочных сталей

### 4.3. Выводы по главе 4

1. Разработана методика одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей судокорпусных конструкций с оценкой сопротивления сварного шва появлению холодных трещин на пробе «Тэккен». Предложено оценивать технологию сварки по заявленному минимуму погонной энергии, без ее распространения на меньшую величину, на которой квалификационные испытания не проводились, а также предложено проводить испытания не менее одной пробы для автоматической сварки в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты), и не менее двух проб для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, механизированной сваркой в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты).

2. Проведена апробация разработанной методики одобрения технологических процессов сварки высокопрочных сталей судокорпусных конструкций, результаты которой подтвердили ее обоснованность и эффективность при оценке риска появления холодных трещин.

Методика внедрена ФАУ «Российский морской регистр судоходства» в пункты 6.2.1, 6.3.1.1.2, 6.3.1.1.4, 6.3.1.7, 6.3.2.1.4, 6.3.2.2.3, 6.3.2.2.6, 6.4.2, 6.4.4.8, 6.6.2.2.2, 6.6.3.6.3 и 6.6.3.7, а также в таблицу 6.4.1.1 части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» НД № 2-020101-118 (см. в приложении В циркулярное письмо № 314-01-1288ц от 18.11.2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. ABC Rules for Materials and Welding (Part 2). –2018. –465 p.
2. Alam N, Dunne D, and Barbaro F (1999) Weld metal crack testing for high strength cellulosic electrodes. In: First International Conference on Weld Metal Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Welds, Wollongong, Australia, 9.1-9.23. WTIA.
3. Alam N, Dunne D, Squires I, Barbaro F and Feng B (1996) Weldment cold cracking—the effect of hydrogen and other factors, In: Proceedings of Joint Seminar Hydrogen Management in Steel Weldments, Melbourne, Australia, 49–60. WTIA.
4. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, division 3 – ASME, NY, 2015 – 422 p.
5. ASTM E338 (2003) Standard Test Method for Sharp-Notch Tension Testing of High-Strength Sheet Materials.
6. ASTM E399 (2009) Standard Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
7. ASTM E647 (2011) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
8. ASTM E8/E8M-16a (2016) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
9. ASTM STP 466 - Impact testing of metals: correlations between KIC and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range (Barsom JM, Rolfe ST.). West Conshohocken: ASTM; 1970. pp. 281-302.
10. AWS B4.0M: 2000: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, Approved by American National Standards Institute, July 25, 2000.
11. Beachem CD (1972) A new model for hydrogen-assisted cracking (Hydrogen “Embrittlement”). Metall Trans 3:437–451.
12. British Standard BS EN 1011-2:2001 Incorporating Amendment No.1 Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 2: Arc welding of ferritic steels. 2001.

13. BS EN 1011-2:2001 Incorporating Amendment No.1 Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 2: Arc welding of ferritic steels. – 2001.– 62 p.
14. BS EN 1321: 1997 Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds.
15. BS EN ISO 17642-2:2005 «Destructive tests on welds in metallic materials — Cold cracking tests for weldments — Arc welding processes — Part 2: Self-restraint tests».
16. Coniglio N, Barbaro F, Linton VM, Gamboa E, and Kurji R (2010) Hydrogen assisted cold cracking susceptibility of weld metal deposited by cellulosic shielded metal arc welding consumables. In: Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, IPC2010, Calgary, Canada. IPC2010-31680.
17. Devletian J. H. (2000). Carbon Equivalent ( $P_{cm}$ ) Limits for Thick and Low Alloy Steels // National Shipbuilding Research Project Report NSRP 0530, U.S. Navy, Carderock Detachment, P. 1-66.
18. DNV Rules for Classification Ships. Part 2 Materials and Welding. – 2018. –217p.
19. EN 1011- 1:2009 Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 1. Общее руководство по сварке электродной дугой.
20. EN 1011- 2:2001 Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 2. Дуговая сварка ферритных сталей.
21. EN 1993-1-12 2009 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700.
22. EN ISO 17642-3 Разрушающие испытания сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 3. Испытания с приложением внешней нагрузки (ИСО 17642-3:2005).
23. EN ISO 2560: 2009 Материалы присадочные. Электроды металлические покрытые для ручной дуговой сварки нелегированных и мелкозернистых сталей. Классификация.

24. EN ISO 3690: 2000 Сварка и родственные процессы. Определение содержания водорода в металле шва от ферритной стали дуговой сваркой.
25. EN ISO 4063: 2010 Сварка и родственные процессы. Перечень и условные обозначения процессов.
26. Fuqian Yang Interaction between diffusion and chemical stresses – *Materials Science and Engineering A* 409 (2005) pp. 153–159.
27. Glover A and Rothwell B (1999) Specifications and practices for hydrogen crack avoidance in pipeline girth welds, In: *First International Conference on Weld Metal Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Welds*, Wollongong, Australia, 13.1-13.18. WTIA.
28. Graville BA, McParlan M (1974) Weld-metal cold cracking. *Met Constr Br Weld J* 6(2):62–63.
29. Hart P (1986) Effects of steel inclusions and residual elements on weldability. *Met Constr*, October, 610–616.
30. <http://www.china-weldnet.com/english/information/II-1587-06.htm>.
31. <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/ru/strenx/ssab-strenx-welding-ru.pdf?m=20170407090433> Рекомендации по выбору сварочных материалов от производителя высокопрочных сталей SSAB Strenx™.
32. IACS Req. 1984/Rev.3 2016 W16 High Strength Steels for Welded Structures.
33. Interaction of hydrogen with crack-tip plasticity: effects of constraint on void growth /Y. Liang, P. Sofronis, R.H. Dodds, Jr. // *Materials Science and Engineering A366* (2004) pp. 397–411.
34. International Association of Classification Societies. Requirements concerning. *Materials and Welding*. –2016. –320 p.
35. JSA - JIS Z 3157 Method of U-Groove Weld Cracking Test. 1993.
36. JSA - JIS Z 3158 Method of Y-Groove Weld Cracking Test. 2016.
37. Kannengiesser T, Boellinghaus T (2013) Cold cracking tests— an overview of present technologies and applications. *Weld World* 57:3–37 Таблица 1.1.
38. Kannengießer Th (2000) Untersuchungen zur Entstehung schweißbedingter Spannungen und Verformungen bei variable Einspannbedingungen im

- Bauteilschweißversuch (in german). [Investigations on the formation of welding-specific stresses and deformations at variable restraint conditions in the component weld test], Dissertation at the University of Magdeburg, Shaker Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-8008-7.
39. Kannengiesser Th., Boellinghaus Th. Cold cracking tests – an overview of present technologies and applications // *Welding in the World*. February 2013, Volume 57, Issue 1, pp 3–37. doi:10.1007/s40194-012-0001-7.
  40. Kinsey AJ. The welding of structural steels without preheats, *Weld J*, 79 (4), 79s-88s.
  41. Kurji R, Griggs J, Linton V, Kotousov A, Gamboa E, Ghomashchi R, and Coniglio N (2013) An improved welding Institute of Canada test for evaluation of high strength pipeline steel weldability. In: *Proc. 6th Pipeline Technology Conference*, Ostend.
  42. Law M, Nolan D, Holdstock R (2008) Method for the quantitative assessment of transverse weld metal hydrogen cracking. *Mater Charact* 59:991–997.
  43. Lazor RB and Graville BA (1983) Effect of microalloying on weld cracking in low carbon steels. *Can Welder and Fabricator*, July, 21–23.
  44. LR Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. –2018. –451p.
  45. Magudeeswaran G, Balasubramanian V, Madhusudhan Reddy G (2008) Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched, and tempered steel weldments. *Int J Hydrog Energy* 33:1897–1908.
  46. McParlan M, Graville BA (1976) Hydrogen cracking in weld metals. *Weld J* 55(4):95s–102s.
  47. Metzbower E. A., Deloach J. J., Lalam S. H., Bhadeshia H. K. D. H. Neural Network Analysis of Strength and Ductility of Welding Alloys for High Strength Low Alloys Shipbuilding Steels // *Ibid* 2001. - № 4. – P. 368-374.
  48. Metzbower E. A., Deloach J. J., Lalam S. H., Bhadeshia H. K. D. H. Neural Network Analysis of Strength and Ductility of Welding Alloys for High Strength Low

- Alloys Shipbuilding Steels // Sci. and Tech. of Welding and J. – 2001. – V. 6, № 2. – P. 116–124.
49. North, T.H., Rothwell, A.B., Glover, A.G. and Pick R.J. (1982). – Weldability of high strength line pipe steels. – Weld. J., August. – P. 243–257.
50. Pargeter R.J. AND Wright M.D. Welding of Hydrogen-Charged Steel for Modification or Repair / Welding Research. – 2010. – Vol.89. – P. 34–42.
51. Pitrun, Miroslav, the effect of welding parameters on levels of diffusible hydrogen in weld metal deposited using gas shielded rutile flux cored wires, PhD thesis, Department of Materials Engineering, University of Wollongong, 2004. <http://ro.uow.edu.au/theses/> 361 p.
52. Ruyter E (1993) Development and assessment of welding procedures for avoiding weld joint cracking in highly restrained offshore steel structures. Dissertation at the University of the Federal Armed Forces Hamburg.
53. Sarrafan S, Ghaini FM and Rahimi E (2010) Weld metal hydrogen cracking in transmission pipelines construction, In: Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010, Calgary, Canada. IPC2010-31240.
54. Schwenk C, Kannengiesser Th, Rethmeier M (2008) Restraint conditions and welding residual stresses in self-restrained cold cracking tests. Proceedings of Trends in welding research 2008, Georgia, USA, 8th International Conference, ISBN –13 978-1-61503-002-6, doi:10.1361/cp2009twr766, pp. 766–773.
55. Shiraiwa, T., Kawate, M., Briffod, F., Kasuya, T., Enoki, M. Evaluation of hydrogen-induced cracking in high-strength steel welded joints by acoustic emission technique (2020) Materials and Design, 190, art. no. 108573.
56. Suzuki H, Yurioka N, Okumura M (1983) A new cracking parameter for welded steels considering local accumulation of hydrogen. Weld World 21(5/6):110–132, Doc. IIS/IIW-755-83.
57. Terasaki T, Akiyama T, Oshita S (1986) Study of local hydrogen content related to root cracking. Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 4(2):378–383. doi: 10.2207/qjws.4.37.

58. TGL 14914 Blatt 5 Ausgabe Juni 1988: Weldability testing – cold cracking resistance of the weld. [In German].
59. Ushio M, Sugitani Y, Kanayama K, Aida I, Hara N and Nakano T (1999) Cracking in GMAW pipeline girth welds based on experiences in pipeline construction in Japan, in: First International Conference on Weld Metal Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Welds, Wollongong, Australia, 10.1-10.19. WTIA.
60. V.Manivelmuralidaran, M. Sakthivel, M. Balaji Cold Crack Susceptibility studies on High Strength Low Alloy Steel 950A using Tekken Test / Journal of Advances in Chemistry. - 2017. Vol.13. N3. 25-31 pp. ISSN 2321 - 807X.
61. Vasudevan R, Stout RD and Pense AW (1981) Hydrogen-assisted cracking in HSLA pipeline steels, Weld J, Sept, 155s-168s.
62. Vasudevan R, Stout RD, Pense AW (1980) A field weldability test for pipeline steels—part I. Weld J 59(3):76s–84s.
63. Yurioka N, Kasuya T (1995) A chart method to determine necessary preheat in steel welding. Weld World 35(5):327–334.
64. Yurioka N, Suzuki H (1990) Hydrogen assisted cracking in c-mn and low alloy steel weldments. Int Mater Rev 35(4):217–249.
65. Алрухайми, А.Г. Воздействие на факторы образования холодных трещин сварного соединения стали 10Г2ФБЮ посредством регулирования погонной энергии / Алрухайми А.Г., Иванов М.А., Тиньгаев А.К., Воронин С.И. // Сварочное производство. 2020. № 2. С. 3-11.
66. Биленко Г.А., Хайбрахманов Р.У, Коробов Ю.С., Компьютерное моделирование при разработке технологии сварки тонкостенных деталей из высокопрочной стали // Metallurg. 2017. №4. С. 25-29.
67. Вышемирский Д.Е. Обоснование критического значения эквивалента углерода на основе оценки свариваемости сталей для труб класса прочности K65 и K70: диссертация кандидата технических наук: 05.02.10 / Вышемирский Дмитрий Евгеньевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)], 2017.- 138 с.

68. Вышемирский Е.М. Исследование свариваемости и разработка технологии сварки высокопрочных трубных сталей в условиях Крайнего Севера: диссертация кандидата технических наук: 05.03.06 / Евгений Мстиславович Вышемирский; [Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина]. – Москва, 2009.- – 134 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2333.
69. Гончаров Н. Г., Колесников О. И., Юшин, А.А. Особенности технологии сварки труб из высокопрочных сталей // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Т. 7.– № 6. – С. 54–59.
70. Гончаров, Н.Г. Повышение стойкости сварных соединений труб против образования холодных трещин / Н.Г. Гончаров, О.И. Колесников, А.А. Братусь // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – №3 (15). – С. 63–67.
71. Гончаров, С.Н. Холодные трещины при сварке высокопрочных среднелегированных сталей [Текст]: [монография] / С. Н. Гончаров, М. П. Шалимов; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Открытое АО "Уральский з-д трансп. машиностроения". - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 94, [1] с.: ил.; 21 см.; ISBN 978-5-321-02196-5.
72. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
73. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
74. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением.
75. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
76. ГОСТ ISO/TR 15608-2020 Сварка. Руководство по системе группирования металлических материалов.
77. ГОСТ Р 56143-2014 Испытания, разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных

- трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 3. Испытания с приложением внешней нагрузки.
78. ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью. М.: Стандартиформ, 2014. – 19 с.
79. Гуднев, С.Ю. Дельгадо Рейна, И.Л. Яковлева // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 12. – С. 1309–1317.
80. Е.Л.Шейман, Сан-Хосе. Классификация микроструктуры сталей Международного института сварки / ISSN 0491-6441. Сварочное производство 2006. №7. С. 33–37.
81. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М., Капустин О.Е., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных трубопроводов, –М.:Логос, –2011, 316 с.
82. ИСО/TR 17844:2004 Сварка. Сопоставление стандартизованных методов предотвращения холодных трещин.
83. Кирьян В.И., Миходуй Л.И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С. 10–17.
84. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / под ред. С. А. Куркина, В. М. Ховова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
85. Компьютерные программы для прогнозирования стойкости сварных соединений легированных сталей против образования холодных трещин / Э. Л. Макаров [и др.] // Изв. вузов. Машиностроение. 1988. No 4. С. 118–122.
86. Коу С. (2002) Сварка металлургия, 2-е изд. Вили, Нью-Йорк.
87. Лобанов Л.М. (2013) Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350-850 МПа/ Л.М. Лобанов, В.Д.

88. Макаров Э. Л., Королева А. Б., Беспалов В. И. Свариваемость низкоуглеродистой трубной стали категории прочности K65 (X80) // Наука и техника в газовой промышленности. - 2009. - № 1. - С. 74-79.
89. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. Машиностроение, 1981. 247 с.
90. Мальцева А.Н. Исследование структуры и свойств высокопрочных феррито-бейнитных сталей, предназначенных для магистральных трубопроводов высокого давления. дис. канд.тех. наук / А,Н, Мальцева. – Челябинск, 2012 – 194 с.
91. Муравьев К.А. Исследование распределения водорода в сварном соединении в зависимости от температурных условий // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.
92. НД № 2-020101-104 Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIV. Сварка. – 2018. –106 с.
93. НД № 2-020101-104. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII Материалы. Российский морской регистр судоходства. – 2018. – 190 с.
94. НД №2-030101-015 Руководство по техническому наблюдению за применением сварки в судостроении и судоремонте. Российский морской регистр судоходства. –2010. –227 с.
95. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г 7-002-86 – М., Энергоатом-издат, 1986 – 525с.
96. ОР-91.200.00-КТН-074-12 Отраслевой регламент «Порядок организации и осуществления строительного контроля за соблюдением проектных решений и качеством строительства подводных переходов МН и МНПП» (с изменением №2) ПАО «Транснефть».
97. РД 50-345–82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение

- характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
98. Ребяков, Ю.Н., Чернявский, А.О., Чернявский, О.Ф. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии – Вестник ЮУрГУ, серия "Машиностроение". – Челябинск, 2010. – вып. 15, № 10 (186). – С.4–16.
99. Рзаева А.Г. Усадочные напряжения, возникающие в корпусной конструкции танкера после переоборудования и методы их предупреждения/ Рзаева А.Г. // Апробация. – 2017. – №1 (52). –С. 7-9.
100. Розанов Д.С. Разработка методики расчета процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода в многослойных сварных соединениях низколегированных сталей: диссертация кандидата технических наук: 05.02.10 / Розанов Дмитрий Сергеевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана] Количество страниц: (2011)120 с. ил. 61 11-5/3363 Электронный ресурс.
101. Руководство по сварке. Том 4: Материалы и приложения, пт. 2. - Майами: AWS, 1998. 620 с.
102. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова.: Машиностроение, 2004. Т. 1. 624 с.
103. Смирнов, М.А. Классификация микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, А.Н. Борякова // Металлург. – 2010. – №7. С. – 45–51.
104. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* (с Изменением N 1).
105. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Ч. 1 / ОАО "Газпром". - М.: Газпром, 2007 (М.: ИД Полиграфия). – 241 с.
106. СТО Газпром 2-2.3-116-2007. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Инструкция по технологии производства работ на газопроводах врезкой под давлением.

107. С.Н. Гончаров, Т.И. Табатчикова, А.Д. Носов, Н.З. Гуднев Структура и вязкость зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали 2014 (12)1309 с.
108. Урцев, В. Н., Шмаков, А. В., Урцев, Н. В., Мокшин, Е. Д., Хабибулин, Д. М., Дегтярев, В. Н., Масленников, К. Б. . ФЕНОМЕНО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ РАСПАДА АУСТЕНИТА НИЗ-КОУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ. Сталь, 2020 (7), 54-57.
109. Флетчер Л., Юриока Н. Целостная модель водородного растрескивания при кольцевой сварке трубопровода. Мир сварных швов 2000 44 (2): 29–36.
110. Хайбрахманов, Р. У., Коробов, Ю.С., & Ярошевич, Д. Л. . СНИЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ САЕ-АНАЛИЗА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ. Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей, 2018 (4(27)), 67-72.
111. Шалимов, М.П., Березовский, А.В., Смоленцев, А.С. . РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2019 21(1), 49-54.
112. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.
113. Якушев, Е.В. Исследование и разработка трубной экономнолегированной стали класса прочности К60 для стана 2800 ОАО, 2014.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **ПРИЛОЖЕНИЕ А.**

#### **Программа испытаний образцов имитаторов сварных соединений на пробах «Тэккен»**

##### **1. Объект испытаний**

1.1. Объект испытаний: Технологическая проба «Тэккен».

1.2. Основной материал: листовой металлопрокат стали PCE500TM толщиной 25,8 мм.

1.3. Сварочные материалы – порошковые проволоки диаметром 1,2 мм марок:

- KOBELCO DW-A70L;
- KOBELCO DW-A65L;
- ESAB FILARC PZ6115;
- ESAB FILARC PZ6125.

1.4. Защитная среда: газовая смесь К-18.

1.5. Погонная энергия сварки  $7 \pm 0,5$  кДж/см – 4 проволоки (DW-A70L, DW-A65L, PZ6115, PZ6125).

1.6. Количество проб «Тэккен»: по 1 шт. на каждую сварочную проволоку согласно п.5.2 ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 и разработанной методике по НИР для автоматической сварки. В программе предусматривается сварка четырех проб с погонной энергией  $7 \pm 0,5$  кДж/см.

##### **2. Цель испытаний**

2.1. Апробация методики оценки сопротивления образованию холодных трещин на сварных соединениях, выполненных проволоками с различными характеристиками прочности наплавленного металла, включая проволоки с меньшей прочностью по сравнению с основным металлом.

2.2. Испытания проб, выполненных проволоками с разным пределом текучести, позволяют подтвердить выявляемость трещин на пробах «Тэккен» и показать влияние предела текучести сварочной проволоки на стойкость против появления холодных трещин при малой погонной энергии.

2.3. Подтверждение применимости результатов испытаний на технологических пробах «Тэккен» для корректировки пСПС, при выборе технологических параметров сварки в части характеристик прочности сварочных материалов.

### **3. Порядок проведения испытаний. Участники**

3.1. Испытания образцов имитаторов сварных соединений на пробах «Тэккен» проводятся в присутствии представителей ЮУрГУ и под наблюдением инспектора Российского морского регистра судоходства (далее по тексту – инспектора РС).

3.2. Порядок проведения испытаний.

3.2.1. Изготовление сборочных деталей пробы «Тэккен».

3.2.2. Контроль сборочных деталей.

3.2.3. Сборка пробы.

3.2.4. Контроль сборки пробы «Тэккен».

3.2.5. Сварка испытываемого сварного шва.

3.2.6. Выдержка проб «Тэккен» после сварки испытываемого шва.

3.2.7. Визуальный контроль сварного шва проб «Тэккен».

3.2.8. Изготовление контрольных образцов для выявления трещин в испытываемом сварном шве пробы «Тэккен».

3.2.9. Измерительный контроль образцов.

3.2.10. Осмотр поверхности контрольных образцов для поиска трещин.

3.2.11. Анализ результатов испытаний.

3.2.12. Оформление результатов испытаний.

#### **4. Место проведения испытаний**

4.1. Учебная лаборатория «Автоматизированных и роботизированных способов сварки» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 103. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

4.2. Учебная лаборатория «Контроль качества сварных соединений» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 218. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

4.3. Производственные помещения НИИ «Опытное машиностроение» ЮУрГУ. Лабораторный корпус. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 141, Южно-Уральский государственный университет.

4.4. Учебная лаборатория «Материаловедение, пробоподготовка и микроструктурный анализ» кафедры «Материаловедения и физико-химии материалов», ауд. 301. Адрес: г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, Южно-Уральский государственный университет.

#### **5. Изготовление сборочных деталей пробы «Тэккен»**

5.1. Испытания по определению сопротивляемости основного и сварочного материалов образованию холодных трещин проводятся на технологических пробах «Тэккен», которые должны быть изготовлены в соответствии с рисунком 1.

5.2. Отбор готовых деталей проб производят сотрудники ЮУрГУ в присутствии инспектора РС в учебной лаборатории «Автоматизированные и роботизированные способы сварки» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ауд. 103. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

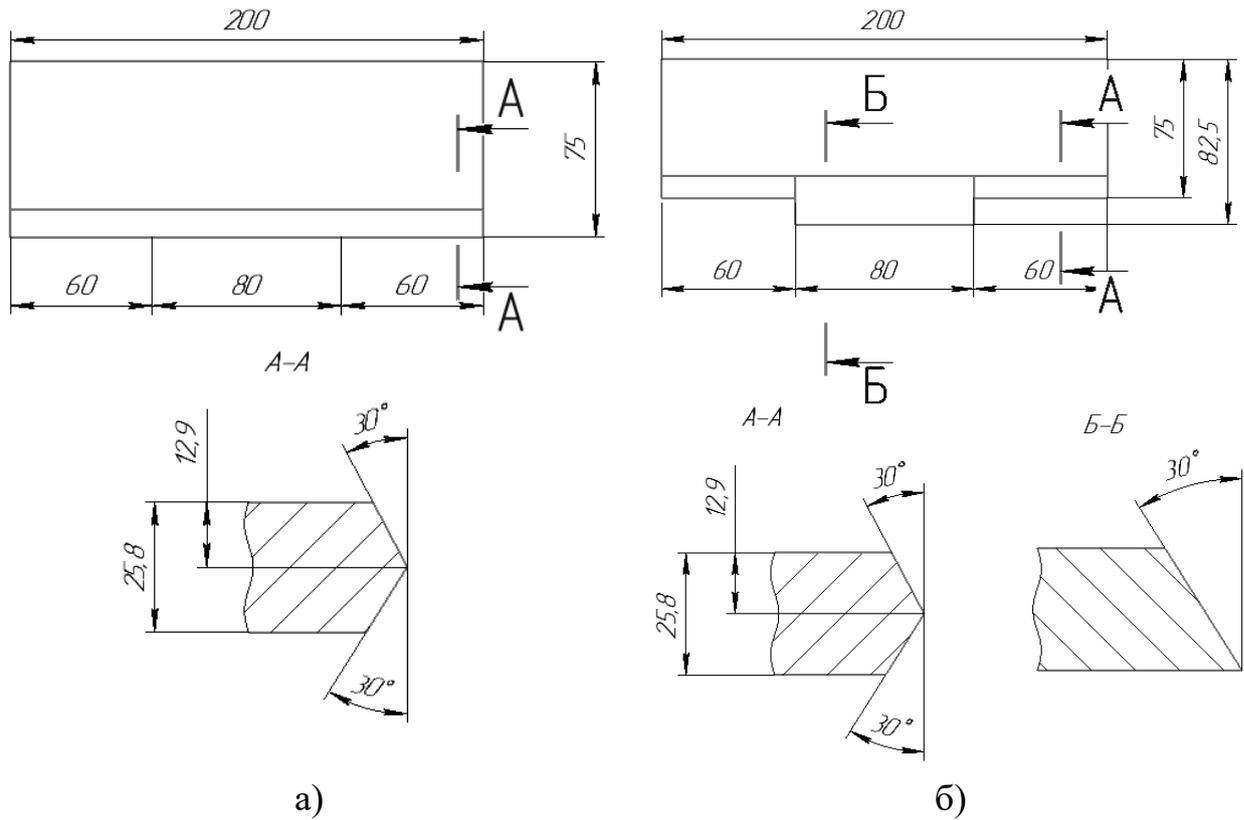


Рис. 1 Эскиз сборочных деталей пробы «Тэккен»

5.3. Сборочные детали пробы «Тэккен» должны быть вырезаны механическим способом (пилой, фрезой или отрезным кругом) с последующей обработкой свариваемых кромок фрезерованием или шлифованием с шероховатостью не более Rz 80.

## 6. Контроль сборочных деталей

6.1. Входной контроль.

6.1.1. Проведение ВИК размеров сборочных деталей. Допуски размеров 1–2 мм, 1–2 градуса.

6.1.2. Шероховатость свариваемых кромок должна быть не более Rz80. Контроль осуществлять с помощью образцов (эталонов) шероховатости или профилометром.

6.1.3. Контроль будет производиться в учебной лаборатории «Контроль качества сварных соединений» кафедры «Оборудование и технология сварочного

производства», ауд. 218. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

## 7. Сборка пробы

7.1. Сборку деталей выполнять ручной дуговой сваркой на прихватках согласно рисунку 2i электродами типа Э46А-Э50А на режимах, рекомендованных производителем. Прихватки устанавливать в местах наложения крепежных сварных швов согласно рисунку 2ii.

7.2. Крепежные сварные швы рекомендуется выполнять проволоками, имеющими механические свойства, как для итогового испытания. Сварку крепежных швов производить на режимах от 10 до 15 кДж/см или на рекомендованных производителем сварочных материалов.

7.3. Сварочное оборудование: источник питания для ручной дуговой сварки Kemppi MasterTIG MLS 2300 AC/DC и сварочный робот для MIG/MAG сварки FANUC ARC Mate 120iC с двухосевым позиционером.

7.4. Сборка пробы производится в учебной лаборатории «Автоматизированных и роботизированных способов сварки» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ауд. 103. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д.143, Южно-Уральский государственный университет.

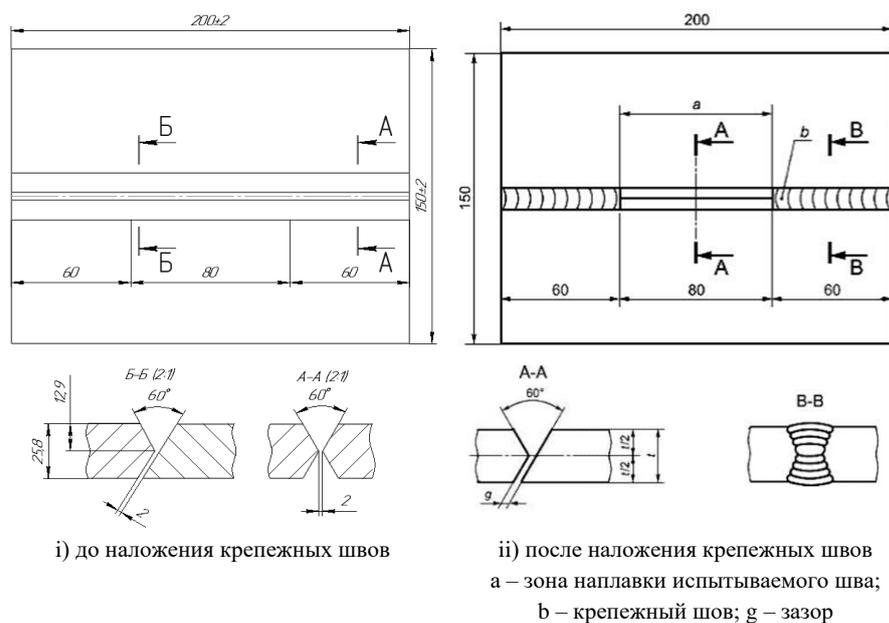


Рис. 2. Сборка пробы «Тэкен»

## **8. Контроль сборки пробы «Тэккен»**

8.1. После выполнения крепежных швов необходимо их охладить до температуры окружающей среды. Подтверждение достижения пробой «Тэккен» температуры окружающей среды осуществляется пирометром или путем выдержки пробы «Тэккен» в течение не менее 1 часа.

8.2. Визуальным и измерительным контролем проверить сборку.

8.2.1. Визуальном контролем проверить на наличие поверхностных макротрещин, длина которых не должна превышать 5 мм.

8.2.2. Измерительному контролю подлежит зазор ( $g$  – см. рисунок 2ii), величина которого должна быть  $2 \pm 0,2$  мм.

8.3. Контроль производится в учебной лаборатории «Контроль качества сварных соединений» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 218. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

## **9. Сварка испытываемого сварного шва**

9.1. Сварку испытываемого сварного шва проводят при температуре окружающего воздуха в нижнем положении в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2ii.

9.2. Поочередно производим сварку проб «Тэккен» в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, проволоками KOBELCO DW-A70L, KOBELCO DW-A65L, ESAB FILARC PZ6115, ESAB FILARC PZ6125 в смеси защитных газов К-18 на сварочном роботе FANUC ARC Mate 120iC – на режимах в соответствии с п. 1.5.

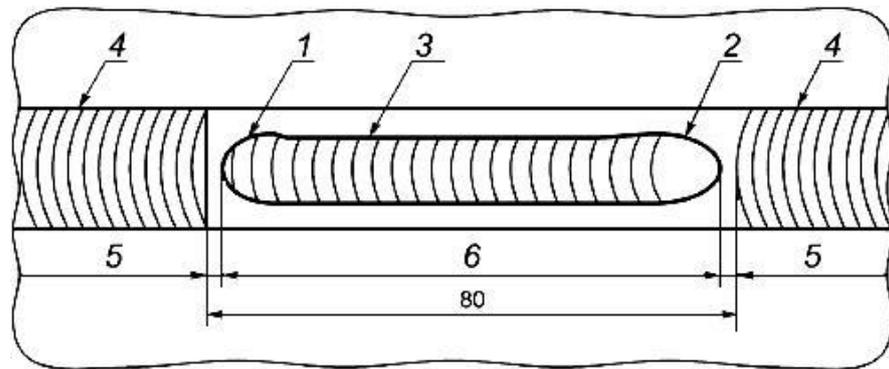


Рис. 3 Схема сварки пробы «Тэккена»

- 1 – начало шва; 2 – окончание шва; 3 – испытываемый сварной шов;  
 4 – крепежный сварной шов; 5 – размер, равный приблизительно 2 мм;  
 6 – размер, равный приблизительно 76 мм

9.3. Сварка испытываемого сварного шва производится в учебной лаборатории «Автоматизированных и роботизированных способов сварки» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 103. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д.143, Южно-Уральский государственный университет.

## 10. Выдержка проб «Тэккен» после сварки испытываемого шва

10.1. После сварки проба «Тэккен» выдерживается двое суток (48 часов). После чего проводится визуальный контроль на наличие видимых трещин. За температуру окружающей среды принимается температура окружающего воздуха при проведении сварочных работ.

10.2. Выдержка пробы «Тэккен» производится в учебной лаборатории «Автоматизированных и роботизированных способов сварки» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 103. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

## 11. Визуальный контроль сварного шва проб «Тэккен»

11.1. Поверхностные трещины должны быть проверены визуальным контролем. Если они будут обнаружены, то дальнейшие работы не проводятся, и проба бракуется. Если визуально трещин не видно, то испытание продолжается контрольных образцах сварного соединения.

11.2. При невозможности установить видимый дефект как трещину – необходимо продолжить испытания на контрольных образцах сварного шва (см. п.12–14).

11.3. Контроль производится в учебной лаборатории «Контроль качества сварных соединений» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 218. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

## **12. Изготовление контрольных образцов для выявления трещин в испытываемом сварном шве пробы «Тэккен»**

12.1. Пробу «Тэккен» необходимо разделить на четыре контрольных образца в соответствии с рис. 4.

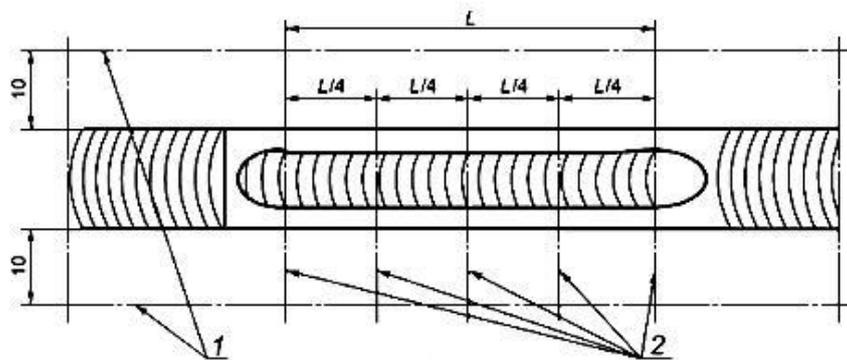


Рис. 4 – Схема вырезки контрольных образцов: 1 – резка в направлении ширины образца; 2 – положение проверяемого сечения; L – длина испытываемого сварного шва, мм

12.2. Вырезку контрольных образцов необходимо производить механическим способом (пилой, фрезой или отрезным кругом) с последующей обработкой поверхностей фрезерованием или шлифованием с шероховатостью не более Rz 40.

12.3. Изготовление контрольных образцов производится в производственных помещениях НИИ «Опытное машиностроение» ЮУрГУ. Лабораторный корпус. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 141, Южно-Уральский государственный университет.

### **13. Измерительный контроль образцов**

13.1. Шероховатость исследуемой поверхности контрольного образца должна быть не более Rz 40. Контроль осуществлять с помощью образцов (эталон) шероховатости или профилометром.

13.2. Контроль производится в учебной лаборатории «Контроль качества сварных соединений» кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ауд. 218. Адрес: г. Челябинск, ул. Коммуны, д. 143, Южно-Уральский государственный университет.

### **14. Осмотр поверхности контрольных образцов на наличие трещин**

14.1. После изготовления макрошлифов следует провести их травление 10%-ным раствором азотной кислоты. Далее необходимо выполнить осмотр или визуально, или с использованием микроскопа с увеличением  $\times 50$ . При этом принятие окончательного решения возможно только, при кратности увеличения не менее  $\times 200$ .

14.2. Визуальный и измерительный контроль проводится с использованием оптического микроскопа Axio Observer D1.m, оснащенного программно-аппаратным комплексом для анализа изображений Thixomet Pro.

14.3. Осмотр на наличие трещин поверхности контрольных образцов производится в учебной лаборатории «Материаловедение, пробоподготовка и микроструктурный анализ» кафедры «Материаловедения и физико-химии материалов» ауд. 301.

### **15. Анализ результатов испытаний**

15.1. При проведении ВИК возможны следующие варианты:

1 – испытание считается положительным, если трещин на образцах не выявлено;

2 – испытание считается положительным, если на образцах обнаружены трещины размером не более 0,5 мм;

3 – испытание считается неудовлетворительным, если на образцах обнаружены трещины размером более 0,5 мм.

15.2. Анализ результатов испытаний производится в учебной лаборатории «Материаловедение, пробоподготовка и микроструктурный анализ» кафедры «Материаловедения и физико-химии материалов» ауд. 301.

### **15. Оформление результатов испытаний**

16.1. По результатам испытаний составляется протокол (заключение). В него необходимо внести сведения об основном и сварочном материалах, режимах сварки и результатах всех видов контроля.

16.2. Протокол испытаний подписывается исполнителями работ, а также руководителем НИР со стороны ЮУрГУ и инспектором Регистра.

16.3. К протоколу испытаний должны быть приложены сертификаты качества на сталь и сварочные материалы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

### Акты и протоколы испытаний проб «Тэккен»



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

#### АКТ №1

измерительного контроля деталей

« 26 » ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д.8

**Объект испытания:** сборочные детали технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю

**Средства измерения:** штангенциркуль ИЦЦ 1-125-0,1 (серийный номер 60520363), линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1), универсальный шаблон сварщика №3 (серийный номер №3), эталоны шероховатости поверхности

**Нормы оценки качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений на пробах Тэккен

#### НОРМАТИВНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Длина, мм	Ширина, мм		Толщина, мм	Угол, град.	Шероховатость
	по А-А	по Б-Б			
200 $\pm$ 2	75 $\pm$ 2	82,5 $\pm$ 2	25,8 $\pm$ 0,9	30 $\pm$ 2 <sup>0</sup>	Не более Rz80

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

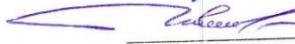
Маркировка детали	Значения параметров					
	Длина, мм	Ширина, мм		Толщина, мм	Угол, град.	Шероховатость
		по А-А	Б-Б			
1-1	201	74,3	–	26,0	30	Не более Rz40
1-2	201	75,2	82,4	25,7	30	Не более Rz40
2-1	201	75,0	–	25,6	30	Не более Rz40
2-2	199	75,3	82,6	25,7	30	Не более Rz40
3-1	201	75,0	–	25,5	30	Не более Rz40
3-2	201	75,1	82,4	25,7	30	Не более Rz40
4-1	201	75,1	–	25,6	30	Не более Rz40
4-2	201	77,8	82,2	25,7	30	Не более Rz40

Примечание – На средства имеются сертификаты калибровки: КА-12454, КА-12455, КА-12456 от 22.10.2018 (сертификаты прилагаются).

Исполнитель работ

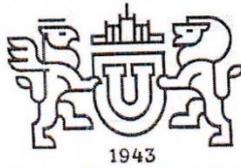
 Ю.В. Безган

Руководитель работ

 М.А. Иванов

Представитель Заказчика

 А.С. Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, http://www.susu.ru/, e-mail: info@susu.ru  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

### АКТ №2

измерительного контроля параметров режима сварки

« 26 » ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской  
регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая  
набережная, д.8

**Объект испытания:** крепёжные сварные швы технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному  
контролю

**Средства измерения:** Программное обеспечение источника питания Kemppi MasterTig MLS  
2300 AC/DC

**Нормы оценки  
качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
на пробах Тэккен

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Маркировка пробы	Параметры режима сварки				
	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки см/с	Погонная энергия Дж/см	
				фактическая	нормативная
1	225	30	0,54	12,4	10 – 15 кДж/см
2	223	29,9	0,49	13,1	
3	223	30	0,54	12,5	
4	224	29,9	0,56	12,0	

Примечание – В таблице приведены средние значения результатов измерений.

Исполнитель работ

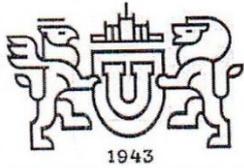
 Ю.В. Безганс

Руководитель работ

 М.А. Иванов

Представитель Заказчика

 А.С. Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, http://www.susu.ru/, e-mail: info@susu.ru  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

### АКТ №3

измерительного контроля зазора

« 26 » ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской  
регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая  
набережная, д.8

**Объект испытания:** технологическая проба Тэккен с крепежными сварными швами

**Метод испытаний:** РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному  
контролю

**Средства измерения:** линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1),  
универсальный шаблон сварщика №3 (серийный номер №3)

**Нормы оценки  
качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
на пробах Тэккен

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Маркировка пробы	Величина зазора в месте наложения испытуемого сварного шва, мм				Нормативное значение
	По левому краю	В середине	По правому краю	Среднее значение	
1	1,9	2,0	2,3	2,07	2±0,2
2	2,1	2,3	2,0	2,13	
3	1,9	1,9	1,8	1,87	
4	2,0	2,0	2,0	2,0	

Примечание – На средства имеются сертификаты калибровки: КА-12455. КА-12456 от 22.10.2018  
(сертификаты прилагаются).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Маркировка пробы	Ширина пробы, мм		Длина пробы, мм	
	измеренная	нормативная	измеренная	нормативная
1	151	150±2	201	200±2
2	152		200	
3	151		201	
4	151		200	

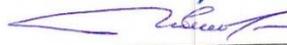
Примечание – Поверхностных макротрещин протяженностью более 5 мм в крепежных сварных швах  
не обнаружено.

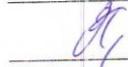
Исполнитель работ

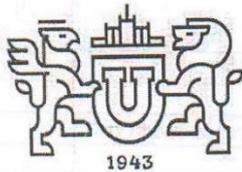
Руководитель работ

Представитель Заказчика

 Ю.В. Безганс

 М.А. Иванов

 А.С. Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

### ПРОТОКОЛ №1

Испытаний пробы Тэккен №1

«30» ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д.8

**Объект испытания:** испытуемый сварной шов технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений

**качества:** на пробах Тэккен

**Оборудование и средства измерения:** линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1), оптический микроскоп Axio Observer D1.m

**Нормы оценки качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений на пробах Тэккен

#### ОСНОВОЙ МЕТАЛЛ

Марка стали: 10Г2ФБЮ (К60) Сертификат № 89434 от 23.12.2017 г.		Толщина материала, мм: 25,8 Направление прокатки: проба по длине ориентирована вдоль прокатки			
Химический состав, %					
C=0,064	Si=0,339	Mn=1,51	P=0,0061	S=0,0006	Cr=0,021
Mo=0,174	Ni=0,21	V=0,0039	Cu=0,032	Nb=0,05	N=0,0053
W=0,0002	Ti=0,013	Al=0,027			
Механические свойства:					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>		
630	520	22	419		

#### СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Марка проволоки: KOBELCO DW-A70L Классификация: AWS A5.29/ ASME SFA-5.29 E101T1-GM		Диаметр, мм: 1,2 Сертификат №120180205 от 13.02.2018	
Механические свойства			
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KV <sup>-50</sup> , Дж
724	668	23	88
Защитный газ: Сварочная смесь K-18		Сертификат (паспорт) качества: №0309 от 04.09.2018 г.	

ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА СВАРКИ		
Наименование	Испытуемый шов	
Способ сварки	Роботизированная сварка в смеси газов (MAG)	
Сила тока, А	173	
Напряжение, В	22,8	
Род тока / Полярность	Постоянный ток / обратная	
Скорость сварки см/с	0,567	
Погонная энергия, кДж/см	6,957	
РЕЗУЛЬТАТЫ		
Номер образца	Поверхностная трещина	Корневая трещина
1-1	Есть	Есть
1-2	Нет	Есть
1-3	Нет	Нет
1-4	Нет	Есть

Примечание – Критериями отбраковки являются видимая поверхностная трещина и корневая трещина протяженностью более 0,5 мм

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания на пробе Тэккен №1 дали **неудовлетворительный** результат.

Исполнитель работ

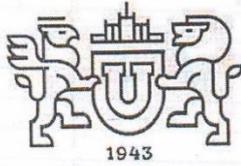
 А.К. Тиньгаев

Руководитель работ

 М.А. Иванов

Представитель Заказчика

 А.С. Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

### ПРОТОКОЛ №2

Испытаний пробы Тэккен №2

«30» ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской  
реестр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая  
набережная, д.8

**Объект испытания:** испытываемый сварной шов технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
качества: на пробах Тэккен

**Оборудование и  
средства измерения:** линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1),  
оптический микроскоп Axio Observer D1.m

**Нормы оценки  
качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
на пробах Тэккен

#### ОСНОВОЙ МЕТАЛЛ

Марка стали: 10Г2ФБЮ (К60) Сертификат № 89434 от 23.12.2017 г.		Толщина материала, мм: 25,8 Направление прокатки: проба по длине ориентирована вдоль прокатки			
Химический состав, %					
C=0,064	Si=0,339	Mn=1,51	P=0,0061	S=0,0006	Cr=0,021
Mo=0,174	Ni=0,21	V=0,0039	Cu=0,032	Nb=0,05	N=0,0053
B=0,0002	Ti=0,013	Al=0,027			
Механические свойства:					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>		
630	520	22	419		

#### СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Марка проволоки: ESAB FILARC PZ6125 Категория: 5Y42 HNS		Диаметр, мм: 1,2 Сертификат №EC25282739 от 29.08.2018			
Механические свойства					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KV <sup>-60</sup> , Дж		
556	445	28,4	109		
Защитный газ: Сварочная смесь K-18		Сертификат (паспорт) качества: №0309 от 04.09.2018 г.			

ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА СВАРКИ		
Наименование	Испытуемый шов	
Способ сварки	Роботизированная сварка в смеси газов (MAG)	
Сила тока, А	170	
Напряжение, В	22,9	
Род тока / Полярность	Постоянный ток / обратная	
Скорость сварки см/с	0,567	
Погонная энергия, кДж/см	6,866	
РЕЗУЛЬТАТЫ		
Номер образца	Поверхностная трещина	Корневая трещина
2-1	Нет	Нет
2-2	Нет	Нет
2-3	Нет	Нет
2-4	Нет	Нет

Примечание – Критериями отбраковки являются видимая поверхностная трещина и корневая трещина протяженностью более 0,5 мм

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания на пробе Тэккен №2 дали удовлетворительный результат.

Исполнитель работ

 А.К. Тингаев

Руководитель работ

 М.А.Иванов

Представитель Заказчика

 А.С.Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

### ПРОТОКОЛ №3

Испытаний пробы Тэккен №3

«30» ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской  
регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая  
набережная, д.8

**Объект испытания:** испытуемый сварной шов технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
качества: на пробах Тэккен

**Оборудование и  
средства измерения:** линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1),  
оптический микроскоп Axio Observer D1.m

**Нормы оценки  
качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений  
на пробах Тэккен

#### ОСНОВОЙ МЕТАЛЛ

Марка стали: 10Г2ФБЮ (К60) Сертификат № 89434 от 23.12.2017 г.		Толщина материала, мм: 25,8 Направление прокатки: проба по длине ориентирована вдоль прокатки			
Химический состав, %					
C=0,064	Si=0,339	Mn=1,51	P=0,0061	S=0,0006	Cr=0,021
Mo=0,174	Ni=0,21	V=0,0039	Cu=0,032	Nb=0,05	N=0,0053
B=0,0002	Ti=0,013	Al=0,027			
Механические свойства:					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>		
630	520	22	419		

#### СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Марка проволоки: KOBELCO DW-A65L Классификация: AWS A5.29 E91T1-K2M-J		Диаметр, мм: 1,2 Сертификат №120182195 от 06.06.2018			
Механические свойства					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KV <sup>-40</sup> , Дж		
715	654	25	90		
Защитный газ: Сварочная смесь K-18		Сертификат (паспорт) качества: №0309 от 04.09.2018 г.			

ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА СВАРКИ		
Наименование	Испытуемый шов	
Способ сварки	Роботизированная сварка в смеси газов (MAG)	
Сила тока, А	174	
Напряжение, В	22,9	
Род тока / Полярность	Постоянный ток / обратная	
Скорость сварки см/с	0,567	
Погонная энергия, кДж/см	7,028	
РЕЗУЛЬТАТЫ		
Номер образца	Поверхностная трещина	Корневая трещина
3-1	Нет	Нет
3-2	Нет	Нет
3-3	Нет	Нет
3-4	Нет	Есть

Примечание – Критериями отбраковки являются видимая поверхностная трещина и корневая трещина протяженностью более 0,5 мм

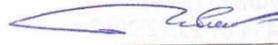
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания на пробе Тэккен №3 дали **неудовлетворительный** результат.

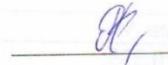
Исполнитель работ

 А.К. Тингаев

Руководитель работ

 М.А.Иванов

Представитель Заказчика

 А.С.Туманов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)  
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

#### ПРОТОКОЛ №4

Испытаний пробы Тэккен №4

«30» ноября 2018 г.

**Заказчик:** Федеральное автономное учреждение «Российский морской регистр судоходства», 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, д.8

**Объект испытания:** испытуемый сварной шов технологической пробы Тэккен

**Метод испытаний:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений на пробах Тэккен

**качества:** линейка измерительная металлическая 0-300 мм (серийный номер 1), оптический микроскоп Axio Observer D1.m

**Оборудование и средства измерения:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений на пробах Тэккен

**Нормы оценки качества:** Программа испытаний образцов-имитаторов сварных соединений на пробах Тэккен

ОСНОВОЙ МЕТАЛЛ					
Марка стали: 10Г2ФБЮ (К60) Сертификат № 89434 от 23.12.2017 г.			Толщина материала, мм: 25,8 Направление прокатки: проба по длине ориентирована вдоль прокатки		
Химический состав, %					
C=0,064	Si=0,339	Mn=1,51	P=0,0061	S=0,0006	Cr=0,021
Mo=0,174	Ni=0,21	V=0,0039	Cu=0,032	Nb=0,05	N=0,0053
W=0,0002	Ti=0,013	Al=0,027			
Механические свойства:					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>		
630	520	22	419		
СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ					
Марка проволоки: ESAB FILARC PZ6115 Категория: 5Y50 MSH5			Диаметр, мм: 1,2 Сертификат №EC25248521 от 25.07.2018		
Механические свойства					
Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KV <sup>-50</sup> , Дж		
662	557	21	93		
Защитный газ: Сварочная смесь К-18			Сертификат (паспорт) качества: №0309 от 04.09.2018 г.		

ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА СВАРКИ		
Наименование	Испытуемый шов	
Способ сварки	Роботизированная сварка в смеси газов (MAG)	
Сила тока, А	170	
Напряжение, В	22,8	
Род тока / Полярность	Постоянный ток / обратная	
Скорость сварки см/с	0,567	
Погонная энергия, кДж/см	6,836	
РЕЗУЛЬТАТЫ		
Номер образца	Поверхностная трещина	Корневая трещина
4-1	Нет	Нет
4-2	Нет	Нет
4-3	Нет	Нет
4-4	Нет	Нет

Примечание – Критериями отбраковки являются видимая поверхностная трещина и корневая трещина протяженностью более 0,5 мм

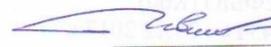
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания на пробе Тэккен №4 дали удовлетворительный результат.

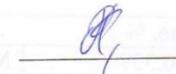
Исполнитель работ

 А.К. Тингаев

Руководитель работ

 М.А.Иванов

Представитель Заказчика

 А.С.Туманов

## ПРИЛОЖЕНИЕ В.

### Акт внедрения результатов работы в нормативные документы Российского морского регистра судоходства

СОГЛАСОВАНО:  
от ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Проректор по научной работе

  
А.А. Дьяконов  
«30» \_\_\_\_\_ 2019 г

УТВЕРЖДАЮ:

от ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»  
Заместитель генерального  
директора



В.И. Евенко

«09 ЯНВ 2020» 2019 г

#### Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Разработка предложений по корректировке требований нормативных документов РС к выбору сварочных материалов и технологическим процессам сварки корпусных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали, включая конструкции, работающие в условиях низких температур», выполненной по договору №17-350898 (2018159) ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (исполнители: **Иванов М.А., Тиньгаев А.К., Чернявский А.О., Шабурова Н.А., Закиров Р.А., Безганс Ю.В., Ильин И.А., Алрухайми А.Г.**), внедрены ФАУ «Российский морской регистр судоходства» в:

- пункты 6.2.1, 6.3.1.1.2, 6.3.1.1.4, 6.3.1.7, 6.3.2.1.4, 6.3.2.2.3, 6.3.2.2.6, 6.4.2, 6.4.4.8, 6.6.2.2.2, 6.6.3.6.3 и 6.6.3.7, а также таблицу 6.4.1.1 части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов, НД № 2-020101-118 (см. циркулярное письмо № 314-01-1288ц от 18.11.2019);
- пункты 1.2.1 и 3.2.1 части XIV «Сварка» Правил классификации и постройки морских судов, НД № 2-020101-114 (см. циркулярное письмо № 314-01-1289ц от 18.11.2019).

от ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Руководитель работ по НИР,  
заведующий кафедрой ОиТСП

  
М.А. Иванов

от ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»

Начальник отдела сопровождения  
нормативных документов и  
координации НИР

  
М.А. Гаппоев



## РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

**ЦИРКУЛЯРНОЕ ПИСЬМО**

**№ 314-01-1288ц**

от 18.11.2019

Касательно:

изменений в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов, 2019, НД № 2-020101-118

Объект(ы) наблюдения:

Технологические процессы сварки

Дата вступления в силу:

**20.12.2019**

Действует до:

Действие продлено до:

Отменяет/ изменяет/ дополняет циркулярное письмо №

от

Количество страниц: 1+9

Приложение(я):

Приложение 1: информация об изменениях, внесенных циркулярным письмом

Приложение 2: текст изменений к части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов»

Генеральный директор

К.Г. Пальников

Текст ЦП:

Настоящим информируем о том, что в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов, по результатам НИР «Разработка предложений по корректировке требований нормативных документов РС к сварочным материалам и технологическим процессам сварки конструкций, изготовленных из высокопрочной стали, включая конструкции, работающие в условиях низких температур», вносятся изменения, приведенные в приложении 2 к настоящему циркулярному письму. Указанные изменения должны применяться в отношении первоначального одобрения технологических процессов сварки, заявки на одобрение которых поданы после даты вступления в силу настоящего циркулярного письма.

Необходимо выполнить следующее:

1. Ознакомить инспекторский состав подразделений РС, а также заинтересованные организации в регионе деятельности РС с содержанием настоящего циркулярного письма.
2. Применять положения настоящего циркулярного письма в практической деятельности РС.

Перечень измененных и/или дополненных пунктов/глав/разделов:

Раздел 6: 6.2.1, 6.3.1.1.2, 6.3.1.1.4, 6.3.1.7, 6.3.2.1.4, 6.3.2.2.3, 6.3.2.2.6, Таблица 6.4.1.1, 6.4.2, 6.4.4.8, Таблица 6.6.2.2.2, 6.6.3.6.3, 6.6.3.7

Исполнитель: Туманов А.С.

314

+7(812) 605-05-29 доб. 2254

Система «Тезис» № 19-302631

**Информация об изменениях, внесенных циркулярным письмом  
(для включения в перечень изменений к соответствующему Изданию РС)**

№	Изменяемые пункты/главы/разделы	Информация по изменениям	№ и дата циркулярного письма, которым внесены изменения	Дата вступления в силу
1	6.2.1	Введено определение «Погонная энергия»	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
2	6.3.1.1.2	Добавлены требования количества проб Тэккен для испытаний	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
3	6.3.1.1.4	Ведены требования к подготовке кромок проб Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
4	6.3.1.7	Введены требования к пробам Тэккен по сопротивляемости основного и сварочного материалов образованию холодных трещин	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
5	6.3.2.1.4	Ведены требования к изготовлению проб Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
6	6.3.2.2.3	Добавлены требования к параметрам режима сварки проб Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
7	6.3.2.2.6	Введена схема сварки испытываемого шва пробы Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
8	Таблица 6.4.1.1	Введены требования к контролю и объему испытаний проб Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
9	6.4.2	Добавлены требования к расположению мест отбора образцов из пробы Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
10	6.4.4.8	Введены требования к испытаниям на сопротивляемость образованию холодных трещин	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
11	Таблица 6.6.2.2.2	Добавлены требования к области одобрения технологического процесса сварки при квалификационных испытаниях на пробе Тэккен	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019

12	6.6.3.6.3	Введены требования к области одобрения технологического процесса сварки по величине погонной энергии	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019
13	6.6.3.7	Добавлены требования к области одобрения технологического процесса сварки при отсутствии предварительного подогрева	314-01-1288ц от 18.11.2019	20.12.2019

**ПРАВИЛА ТЕХНИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОСТРОЙКОЙ СУДОВ И  
ИЗГОТОВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СУДОВ, 2019,****НД № 2-020101-118****ЧАСТЬ III. ТЕХНИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ИЗГОТОВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ****6 ОДОБРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ СТАЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ**

1 **Пункт 6.2.1** после определения «Отчетность по одобрению технологического процесса сварки» дополняется определением «Погонная энергия  $E_1$ » следующего содержания:

«Погонная энергия  $E_1$  — электрическая энергия, расходуемая на единицу длины шва и вычисляемая по формуле  $E_1 = \frac{IU}{v}$ , кДж/см, где  $I$  — сварочный ток, А;  $U$  — сварочное напряжение, В;  $v$  — скорость сварки, см/с.».

2 **Пункт 6.3.1.1.2** заменяется текстом следующего содержания:

«**6.3.1.1.2** Размеры или количество проб сварных соединений должны быть достаточными для выполнения требований к объему квалификационных испытаний согласно изложенным ниже указаниям. Для проведения дополнительных испытаний и/или для изготовления образцов для повторных испытаний могут быть изготовлены дополнительные пробы или пробы больших размеров по отношению к минимальному размеру в соответствии с требованиями настоящего раздела.

Количество проб Тэккен для испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин должно составлять:

не менее одной пробы для автоматической сварки в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты);

не менее двух проб для ручной дуговой сварки покрытыми электродами, частично механизированной сваркой в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты).».

3 **Пункт 6.3.1.1.4** заменяется текстом следующего содержания:

«**6.3.1.1.4** Подготовка кромок и сварка проб должны выполняться в соответствии с требованиями пСПС, подлежащей квалификационным испытаниям. При этом должны соблюдаться общие условия сварки в производственных условиях для технологического процесса, подлежащего одобрению Регистром.

Подготовка кромок проб Тэккен должна выполняться механическим способом (пилой, фрезой или отрезным кругом) с последующей обработкой свариваемых кромок фрезерованием или шлифованием с шероховатостью не более Rz 80. Подлежащие сварке поверхности должны быть ровными, не иметь окалины, ржавчины, масла, смазки и других загрязнений. Кромки контрольного образца, не подлежащие сварки, могут быть в состоянии после газовой резки.».

4 Вводится **новый пункт 6.3.1.7** следующего содержания:

«**6.3.1.7** Одобрение технологических процессов сварки высокопрочных сталей выполняется с учетом результатов испытаний по сопротивляемости основного и сварочного материалов образованию холодных трещин по ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 на пробе Тэккен, соответствующей рис. 6.3.1.7.

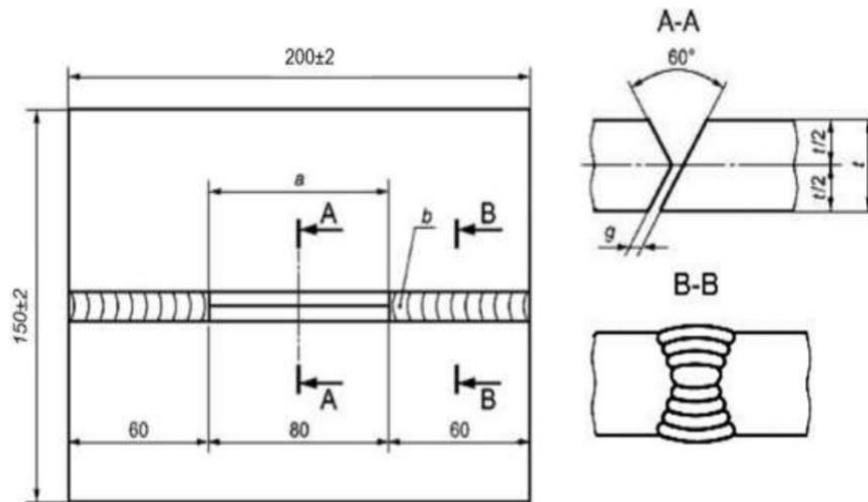


Рис. 6.3.1.7

Проба Тэккен после наложения крепежных швов:

$a$  – зона наплавки испытываемого шва;  $b$  – крепежный шов;  $g$  – зазор в корне шва, равный  $(2,0\pm 0,2)$  мм;  $t$  – толщина пластины, принимаемая наибольшей из заявленных толщин для данной марки стали, но не менее 12 мм.».

4 Вводится **новый пункт 6.3.2.1.4** следующего содержания:

«**6.3.2.1.4** Для пробы Тэккен. Крепежные сварные швы должны выполняться сварочными материалами, используемыми для испытываемого сварного шва. Сварка крепежных швов должна производиться на режимах, рекомендованных производителем сварочных материалов. Для сварки крепежных швов допускается применение и других сварочных материалов с пределом текучести равным или меньшим пределу текучести основного металла не более чем на 25 %. Для предупреждения водородного растрескивания сварные швы должны выполняться с использованием при необходимости предварительного нагрева, нагрева между выполнением сварочных проходов и нагрева после сварки. Для обеспечения наименьшего содержания водорода, все сварочные материалы, используемые для выполнения крепежных швов, должны подвергаться сушке согласно рекомендациям изготовителя. После выполнения крепежных швов необходимо их охладить до температуры окружающей среды и проверить визуально на наличие поверхностных трещин согласно ИСО 17637 (класс контроля не регламентируется).».

5 **Пункт 6.3.2.2.3** заменяется текстом следующего содержания:

«**6.3.2.2.3** Параметры режима сварки должны соответствовать требованиям пСПС. При этом сварку проб следует выполнять для наиболее неблагоприятных условий, например, при максимальных значениях сварочного тока и погонной энергии (для случая, когда требуется обеспечить требования по работе удара) или при пониженной на 25 % от пСПС погонной энергии при сварке высокопрочных сталей на пробе Тэккен (для проверки сопротивляемости образованию холодных трещин). Невыполнение этого условия проведения испытаний требует дополнительного обоснования и, в случае его отсутствия или некорректности, Регистр вправе потребовать от изготовителя сварных конструкций

ограничения режимов сварки в пСПС до значений, фактически применявшихся при испытаниях и соответствующих области одобрения.»

6 Вводится **новый пункт 6.3.2.2.6** следующего содержания:

«**6.3.2.2.6** Схема сварки испытываемого шва пробы Тэккен должна соответствовать рис. 6.3.2.2.6. Шов выполняется за один проход. После сварки образец необходимо выдержать при температуре окружающей среды не менее 48 ч до начала проведения контроля на наличие трещин. За температуру окружающей среды принимается температура окружающего воздуха при проведении сварочных работ. Данную температуру необходимо занести в СПС.

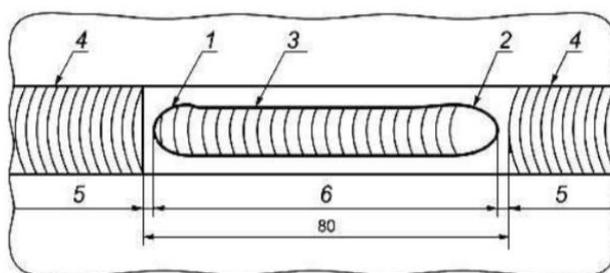


Рис. 6.3.2.2.6

Схема сварки испытываемого шва пробы Тэккен:

1 – начало шва; 2 – окончание сварного шва; 3 – испытываемый сварной шов; 4 – крепежный сварной шов;  
5 – размер, равный приблизительно 2 мм; 6 – размер, равный приблизительно 76 мм.

7 **Таблица 6.4.1.1** «Требования к объему испытаний при одобрении технологических процессов сварки» дополняется строкой «4» следующего содержания:

№ п/п	Тип пробы	Вид контроля и испытаний	Объем испытаний
4	Проба Тэккен	Внешний осмотр и измерение на предмет выявления поверхностных трещин Контроль макрошлифов испытываемого сварного шва на предмет выявления трещин	100 % длины шва  4 поперечных макрошлифа в случае отсутствия видимых поверхностных трещин сварного шва

».

8 **Текст пункта 6.4.2** заменяется текстом следующего содержания:

**«6.4.2 Требованию по отбору образцов для механических испытаний.**

Отбор образцов для проведения механических испытаний должен выполняться после проведения неразрушающего контроля проб сварных соединений и положительной оценке его результатов, в объеме требований табл. 6.4.1.1. Если возможно, отбор образцов следует выполнять из мест пробы, в которых были обнаружены допустимые для соответствующих методов неразрушающего контроля дефекты.

Расположение мест отбора образцов из проб сварных соединений для выполнения механических испытаний должно соответствовать рис. 6.4.2-1 — 6.4.2-5. Расположение мест отбора образцов из пробы Тэккен должно соответствовать рис. 6.4.2-6.»

9 Пункт 6.4.2 дополняется следующим **новым рисунком 6.4.2-6**:

«

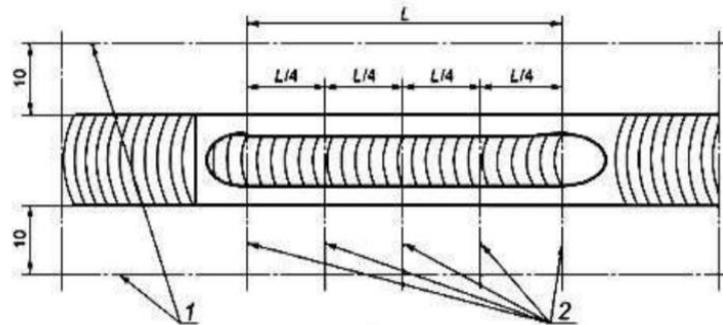


Рис. 6.4.2-6

Схема отбора образцов:

- 1 – резка в направлении ширины образца;  
2 – положение проверяемого сечения.»

10 Вводится **новый пункт 6.4.4.8** следующего содержания:

«**6.4.4.8** Испытание на сопротивляемость образованию холодных трещин.

**6.4.4.8.1** Испытываемый сварной шов должен быть проверен на наличие поверхностных трещин визуально согласно ИСО 17637 (класс контроля не регламентируется). В случае наличия видимых поверхностных трещин, испытание считается давшим неудовлетворительные результаты. Если трещин не обнаружено, то необходимо провести исследования контрольных образцов сварного шва на макрошлифах.

Примечание. При невозможности идентифицировать видимый дефект как трещину необходимо продолжить исследование контрольных образцов сварного шва на макрошлифах.

**6.4.4.8.2** Поверхности макрошлифов должны быть подготовлены согласно 6.4.4.6 и осмотрены на предмет наличия возможных трещин. Осмотр проводится через оптический прибор с увеличением не менее  $\times 50$ . Вывод об отсутствии трещин на образцах подтверждают при увеличении не менее  $\times 200$ . Возможны следующие 3 варианта результатов осмотра:

- .1 трещин на макрошлифах не обнаружено, испытание считается давшим удовлетворительные результаты;
- .2 на макрошлифах обнаружены трещины длиной менее 0,5 мм включительно, испытание считается давшим удовлетворительные результаты;
- .3 на макрошлифах обнаружены трещины длиной более 0,5 мм, испытание считается давшим неудовлетворительные результаты.

Примечание. При наличии трещин в ближайших к крепежным швам сечениях первого и последнего контрольных образцов, необходимо визуально оценить площадь наплавленного металла, которая не должна быть существенно меньше площади сечения наплавленного металла с противоположной стороны, указанного контрольного образца. В противном случае следует провести повторное шлифование контрольного образца со стороны сечения с меньшей площадью наплавленного металла до площади близкой к шву с обратной стороны и провести повторную проверку на наличие трещин.

**6.4.4.8.3** При получении неудовлетворительных результатов испытаний необходимо внести изменения в пСПС в технологию сварки. При внесении изменений в технологию сварки необходимо провести повторные испытания на сопротивление образованию холодных трещин.

Примечание. Повышение сопротивления образованию холодных трещин может быть обеспечено за счет применения предварительного подогрева, увеличения погонной энергии сварки, использования более «мягких» пластичных сварочных материалов и др.

При выборе температуры подогрева, допускается руководствоваться:

.1 табл. 6.4.4.8.3;

.2 рекомендациями по сварке металлических материалов Британского стандарта EN 1011- 2, где учтено влияние на температуру подогрева ( $T_p$ ), углеродного эквивалента (CET), толщины пластины ( $d$ ), содержания диффузионного водорода в металле сварного шва (HD) и погонной энергии сварки ( $Q$ ) в следующей формуле:

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times tg(d/35) + 62 \times HD \cdot 0,35 + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Это соотношение действительно для конструкционных сталей с параметрами:

YS до 1000 МПа;

CET = от 0,2 до 0,5 %;

$d$  = от 10 до 90 мм;

HD = от 1 до 20 мл/100 г;

$Q$  = от 0,5 до 4,0 кДж/мм.

При назначении температуры предварительного подогрева по приведенным рекомендациям из двух температур выбирается наименьшая. При получении неудовлетворительного результата испытаний (трещины в пробе) необходимо увеличивать температуру предварительного подогрева вплоть до межваликовой температуры в соответствии с пСПС.

Таблица 6.4.4.8.3

#### Требования по температуре подогрева при сварке сталей высокой прочности

Категория свариваемой стали	Толщина металла, мм	Температура окружающего воздуха, °С	Содержание диффузионного водорода в напл. металле, см <sup>3</sup> /100 г	Минимальная температура подогрева, °С
(A/F)690	До 130	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)	80
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100
		От 0 до -10	До 3,0 (НЗ)	120
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	130
		От -11 до -15	До 3,0 (НЗ)	На основании рекомендаций изготовителя, согласованных с РС
		(A/F)690 и (A/F)550	До 40	От 0 и выше
Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	60			
От 0 до -15	До 3,0 (НЗ)			80
	Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)			100
От -16 до -20	До 3,0 (НЗ)			На основании рекомендаций изготовителя, согласованных с РС
41-100	От 0 и выше			До 3,0 (НЗ)
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100
	От 0 до -15		До 3,0 (НЗ)	120
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	120
	От -16 до -20		До 3,0 (НЗ)	На основании рекомендаций изготовителя, согласованных с РС

Категория свариваемой стали	Толщина металла, мм	Температура окружающего воздуха, °С	Содержание диффузионного водорода в напл. металле, см <sup>3</sup> /100 г	Минимальная температура подогрева, °С	
(A/F)500	До 40 вкл.	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)	Без подогрева	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	40	
			Свыше 5,0 до 10,0 (Н10)	60	
		Ниже 0 до -15	До 3,0 (НЗ)	60	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	80	
			Ниже -15 до -20	До 3,0 (НЗ)	100
	Свыше 40 до 100 вкл.	От 0 и выше	До 3,0 (НЗ)	60	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	80	
		Ниже 0 до -15	До 3,0 (НЗ)	80	
			Свыше 3,0 до 5,0 (Н5)	100	
		Ниже -15 до -20	До 3,0 (НЗ)		На основании рекомендаций изготовителя, согласованных с РС

Примечания: 1. Таблица устанавливает минимальный уровень требований к температуре подогрева и межпроходной температуре для закаленной и отпущенной стали по показателю склонности к образованию холодных трещин.  
2. Для сталей категорий (A/F)500, изготовленных с применением термомеханической обработки с ускоренным охлаждением и имеющих Сэвк ≤ 0,41 %, допускаются более низкие температуры подогрева и межпроходные температуры.  
3. Фактические значения температур подогрева и межпроходной температуры подлежат одобрению Регистром на основании испытаний по одобрению технологических процессов сварки, включающих контроль всех ограничивающих параметров для конкретного проекта (максимальная твердость зоны термического влияния, шва и т. п.).  
4. Подогрев перед сваркой регламентируется для способов сварки с величиной погонной энергии не превышающей 3,5 кДж/мм.  
5. Сварка сталей с пределом текучести более 690 МПа выполняется при положительных температурах (выше 0°С), в случаях выполнения сварочных работ при отрицательных температурах (в интервале от 0 °С до -10 °С) низколегированными сварочными материалами значения минимальной температуры подогрева увеличиваются на 50 °С. При температурах от -10 °С до -25 °С сварка выполняется исключительно аустенитными сварочными материалами с предварительным подогревом кромок не менее 40 °С.

11 **Таблица 6.6.2.2.2** «Требования к области одобрения по толщинам основного металла  $t$  для швов стыковых и Т-образных соединений, а также для угловых швов без разделки кромок». Графа «Область одобрения» дополняется сноской «4» следующего содержания:

«<sup>4</sup>При квалификационных испытаниях на пробе Тэккен область одобрения ограничивается от 3 до 1,0 $t$  включительно.».

12 Вводится **новый пункт 6.6.3.6.3** следующего содержания:

«**6.6.3.6.3** Область одобрения технологического процесса сварки по величине погонной энергии не может быть меньше номинального значения, которое имело место при сварке пробы Тэккен в процессе квалификационных испытаний.».

13 **Пункт 6.6.3.7** дополняется следующим текстом:

«При отсутствии температуры предварительного подогрева область одобрения технологического процесса сварки не должна быть ниже температуры окружающей среды, которая имела место в процессе сварки пробы при проведении квалификационных испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин. Указанные температуры должны быть отражены в протоколах испытаний и должны быть внесены в СПС.»

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г.**

Сертификат RUSMETALCON



# СЕРТИФИКАТ

Настоящим удостоверяется, что

*Ал рухайми А.Б.*

**принял участие в Международной  
научно-практической конференции  
«Материаловедение  
и металлургические технологии»**

**22-24 сентября 2020 г.,**

**г. Челябинск, Россия**

**Председатель оргкомитета,  
доктор техн. наук, профессор**



**А.А. Радионов**