

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Должность, место работы

Подпись _____ И.О. Фамилия
« ____ » _____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ М.А. Иванов

« ____ » _____ 2017 г.

Трещиноустойчивость металла шва сварного соединения при его охлаждении

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ)**

Руководитель ВКР

Доцент кафедры ОиТСП ЮУрГУ

Должность

_____ **А.К. Тиньгаев**

Подпись

И.О., Фамилия

« ____ » _____ 2017 г.

Автор ВКР

_____ **Евдокимов Артем**

Евгеньевич

« ____ » _____ 2017 г.

**Нормоконтролёр
преподаватель**

_____ **Ю.В. Безганс**

« ____ » _____ 2017 г.

Челябинск, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ	7
1 ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛИ	9
1.1 Условия образования трещин	9
1.2 Механизм возникновения и развития внутренних напряжений в сварном шве	10
1.3 Понятие и виды горячих трещин	11
1.4 Понятие холодных трещин	12
1.5 Цели и задачи работы	12
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТИ СТАЛИ	13
2.1 Показатели трещиноустойчивости стали	13
2.2 Запас технологической прочности стали $T_c^\sigma(t)$	14
2.3 Методика определения трещиноустойчивости стали	15
2.4 Методика определения и использования дилатометрических характеристик в определении трещиноустойчивости стали	16
2.5 Высокотемпературные испытания образцов на растяжение	18
2.6 Испытания на релаксацию	19
2.7 Определение показателей трещиноустойчивости стали 20 с учетом релаксации напряжений	20
3 ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	24
3.1 Моделирование технологической пробы «Теккен» для оценки склонности металла к образованию трещин в программе ESI SYSWELD	24
3.2 Разработка новой технологической пробы «ОиТСП 01»	27
3.3 Анализ результатов исследования технологической пробы «ОиТСП 01»	30
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ESI SYSWELD	32
4.1 Анализ пробы «Теккен»	32
4.2 Анализ пробы «ОиТСП 01»	37
4.3 График трещиноустойчивости сварной конструкции	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность обозначенной темы объясняется наличием трещин в сварных соединениях. К тому же механизм образования трещин изучен качественно, но не количественно. Это затрудняет применение профилактических приёмов в технологических процессах, что вызывает большие убытки в производстве изделий, получаемых сваркой.

Процессы образования трещин в сварных швах включают в себя большое количество физических явлений, которые выявляются путем изучения сложных сопутствующих схем и приведения их к упрощению без нарушения связей. Такой подход необходимо использовать для учета напряжений и деформаций. В данной работе используются интенсивности напряжений и деформаций, которые учитывают не только нормальные параметры, но и тангенциальные, о чем свидетельствуют расположения трещин [11]. Это позволяет использовать испытания образцов для обоснований параметров разрушения литого металла, сформированного при охлаждении сварного шва или простых образцов со структурой литого металла.

Справедливость излагаемых результатов исследований подтверждается примерами [11] предотвращения трещин в отливках, которые раньше требовали ремонта.

В работе использовали различные методы исследований: литейные, металловедческие и сварочные для данной темы. Специфика заключается в том, что разработанные методы применялись впервые, и для них требовалась терминология, понятная всем специалистам этих профессий.

Специалисты сварочного производства определяют трещиностойкость простым способом исследований типа заливки проб, и по наличию или отсутствию признаков трещинообразования в пробе судят о влиянии исследуемого фактора на его свершение.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

В первой главе представлены объекты исследований – понятия трещиностойкости стали и сварного шва, их физические и математические описания с акцентом на их различия. Понятия горячих и холодных трещин, причины их образования и методы борьбы с ними.

Вторая глава представляет собой методику экспериментального определения трещиностойкости стали и ее исполнение на примере стали марки сталь 20.

В третьей главе приводятся технические характеристики пробы «Теккен» и разработанной нами пробы «ОиТСП 01», анализ микроструктурных исследований разработанной нами пробы, а так же выполнено моделирование сварочного процесса возникающего в пробе «Теккен» и пробе «ОиТСП 01» в системе ESI SYSWELD

В четвертой главе выполнен анализ результатов моделирования ESI SYSWELD, построен график трещиностойкости сварного соединения.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ

$T_c^\sigma(t)$ – трещиностойчивость стали по напряжениям при температуре t в пределах интервала охлаждения, ед.

$T_c^\varepsilon(t)$ – трещиностойчивость стали по деформации при температуре t в пределах интервала охлаждения, ед.

$T_c^A(t)$ – трещиностойчивость стали по удельной работе разрушения при температуре t в пределах интервала охлаждения, ед.

$\sigma(t)$ – напряжение при температуре t , МПа.

$\varepsilon(t)$ – деформации при температуре t , ед.

$\varepsilon(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K)$ – деформации при температуре конца феррито-перлитного превращения, ед.

$\varepsilon(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H)$ – деформации при температуре начала феррито-перлитного превращения, ед.

$\delta_y(t)$ – упругая деформация при температуре t , ед.

$\delta_n(t)$ – пластическая деформация при температуре t , ед.

$\delta_T(t)$ – предел текучести при температуре t , ед.

$A_y(t)$ – удельная работа усадки при температуре t , Дж/м².

$A_{з.т}(t)$ – удельная работа зарождения трещины при температуре t , Дж/м².

$\sigma_B(t)$ – временное сопротивление разрыву при температуре t , МПа.

$\sigma_{0,2}(t)$ – предел текучести при температуре t , МПа

$\sigma^\circ(t)$ – напряжение при полном торможении усадки или после релаксации с фиксированной скоростью охлаждения при температуре t , МПа.

$\varepsilon^\circ(t)$ – деформация при полном торможении усадки или после релаксации с фиксированной скоростью охлаждения при температуре t , ед.

$\varepsilon^\circ(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K)$ – деформация при полном торможении усадки или после релаксации с фиксированной скоростью охлаждения при температуре конца феррито-перлитного превращения, ед.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

$\varepsilon^{\circ}(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H)$ – деформация при полном торможении усадки или после релаксации с фиксированной скоростью охлаждения при температуре начала феррито-перлитного превращения, ед.

$A_y^{\circ}(t)$ – удельная работа усадки при полном торможении усадки или после релаксации с фиксированной скоростью охлаждения при температуре t , Дж/м².

$\varepsilon_c(t)$ – свободная усадка стали при температуре t , ед.

$\varepsilon_3(t)$ – затрудненная или фактическая усадка, ед.;

ε – относительная усадка стали, ед.

$T_o^{\sigma}(t)$ – трещиностойкость изделия по напряжениям при температуре t , ед.

$T_o^{\varepsilon}(t)$ – трещиностойкость изделия по деформациям при температуре t , ед.

$T_o^A(t)$ – трещиностойкость изделия по удельной работе разрушения при температуре t , ед.

t – температура, °С.

τ – время, с.

t_L – температура ликвидуса сплава, °С.

t_S – температура солидус сплава, °С.

t_y^H – температура начала усадки, °С.

$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$ – температура начала феррито-перлитного превращения, °С.

$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$ – температура конца феррито-перлитного превращения, °С.

t_d^H – температура начала деформации, °С.

t_{ox}^H – температура начала охлаждения образца, °С.

t_{1300} – температура 1 300 °С.

t_{20} – температура окружающей среды, °С.

перлитного превращения, МПа.

V_{ox} – скорость охлаждения, °С/с.

$V_{ox.1}, V_{ox.2}$ – скорости охлаждения участков изделия, °С/с.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

1 ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛИ

1.1 Условия образования трещин

Понятие трещиноустойчивости сплава (стали) трактуется по-разному. В данном случае это понятие отождествляется с процессом разрушения металла сварного шва в условиях непрерывного охлаждения его с температуры нулевой жидкотекучести, когда он теряет способность к перемещению под действием гравитационных сил (металлостатического давления) и начинает деформироваться по законам твердого тела. С реологической точки зрения литейный сплав проходит несколько состояний [5, 12] от капельной жидкости Ньютона до абсолютно хрупкого тела. Важным состоянием, которое оказывает заметное влияние на трещиноустойчивость стали является состояние подобное телу Максвелла [5]. Металловеды [2, 4] отождествили этот период деформирования с твердым телом, и когда объяснения оказались неубедительными, обратили внимание на пластичность и темп усадки, как на факторы трещиноустойчивости.

Специалисты сварочного производства [5] обнаружили высокую трещиноустойчивость пластичных силуминов. Это стало обоснованием влияния пластичности на процесс образования трещин в отливках. К тому же обратили внимание на темп усадки [3]. Высокие напряжения и темпы усадки сплавов в сочетании с низкой пластичностью были признаны важными факторами низкой трещиноустойчивости стали при сварке.

Данные объяснения не находили признания у производителей, особенно стального литья. Трещины возникали там, где казалось, они не могли быть. Это служило поводом для всё новых исследований, особенно в направлении вероятности образования трещин в стальных отливках в температурных интервалах ЭИК и ТИХ, что утверждалось авторами [7]. При этом «количественно характеристикой стойкости металла против образования» трещин рекомендовалось считать «разность между минимальным относительным удлинением» в ЭИК и «величиной свободной температурной

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

деформации (линейной усадки) при температуре этого минимума». Фактически авторы этой статьи признали неизбежность образования трещин.

В работе [5] обоснована трещиностойчивость как запас технологической прочности без учета влияния пластичности металла, так как исследования проводили на пластичном материале (силумине).

Поставленная задача рассматривается здесь с позиции статики. В соответствии с законами статической прочности условиями разрушения сплава, в нашем случае образования трещин, могут быть три следующих неравенства (1 – 3):

$$\sigma(t) > \sigma_B(t), \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) > \delta_y(t) + \delta_{\pi}(t), \quad (2)$$

$$A_y(t) > A_{з.т}(t) . \quad (3)$$

1.2 Механизм возникновения и развития внутренних напряжений в сварном шве

Образование трещин всегда считали [1-5, 11-14] следствием высокими внутренних напряжений, возникающих в период охлаждения сварного шва. Однако управлять таким состоянием не всегда удавалось, что свидетельствует о недостаточной изученности процесса разрушения металла в период его охлаждения. Часто единицами измерений склонности сплава к образованию трещин оказывались такие характеристики как нагрузка, которую выдерживает металл в интервале затвердевания, или просто наличие и количество трещин в пробах, а также уровень временного сопротивления разрыву проб в условиях их охлаждения и затвердевания. Были попытки сравнения усадки стали с прочностью и удлинением металла в интервалах наибольшей вероятности образования трещин, названных эффективным интервалом кристаллизации (ЭИК) [2] и температурным интервалом хрупкости (ТИХ) [3]. Позднее [4] был обоснован термин горячеломкости, который также использовался в качестве показателя трещиностойчивости, в том числе стали.

Возникающие внутренние напряжения в швах обусловлены усадкой и ее

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

торможением. Поэтому для расчета внутренних напряжений в сварных швах давно приняты [1-7] соотношения с участием усадки как температурной деформации, возникающей при их охлаждении.

На основе изложенного была принята математическая модель трещиностойкости, под которой подразумевается комплексное технологическое свойство сплава, как запас технологической прочности при условиях формирования сварного соединения и полном торможении усадки, что означает $T_c^\sigma(t) = \frac{\sigma_B(t)}{\sigma^\circ(t)}$, где $\sigma^\circ(t)$ – справочная величина, полученная при охлаждении металла в интервале $t_y^H - t_{20}$ и зависит только от его температурного интервала, природы сплава, величины его свободной усадки и скорости охлаждения.

1.3 Понятие и виды горячих трещин

Горячие трещины являются одним из видов высокотемпературных межкристаллических разрушений. Они возникают при неблагоприятном сочетании факторов, таких как: понижение деформационной способности металла из-за наличия в структуре легкоплавких эвтектиков, дефектов строения кристаллической решетки, выделения хрупких фаз и воздействия внешних и внутренних напряжений [4].

Горячие трещины бывают кристаллизационные или ликвационные. Кристаллизационные образуются при температуре, превышающей температуру солидуса. Ликвационные образуются из-за наличия в сталях различных включений (в основном сульфидов), которые при сварке растворяются в зоне термического влияния образуя сульфидную плёнку. Это плёнка располагается по границам зерен и снижает их когезионную прочность.

Для уменьшения риска возникновения горячих трещин в сварном соединении, нужно обеспечить оптимальное раскисление металла при сварке. То есть устранить отрицательное воздействие серы на образование горячих трещин. Одним из способов является связывание серы с титаном, цирконием

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

или редкоземельными металлами. При содержании серы до 0,02% можно избежать горячих трещин при сварке.

1.4 Понятие холодных трещин

Холодные трещины образуются по окончании процесса сварки или во время наплавки дополнительного слоя металла. Образование трещин происходит при низких температурах не превышающих 200°С.

Холодные трещины делят на продольные и поперечные (возникают при большой толщине сварного шва). Самые распространённые места для образования холодных трещин это корень сварного шва и место сплавления сварочного валика с основным металлом.

Основной причиной образования холодных трещин при сварке является водород. Водород проникает в сварной шов из электродного покрытия, флюса, окружающей среды. Так же водород может присутствовать в составе защитных газов или загрязнений на сварочных кромках или проволоке.

Для уменьшения риска образования холодных трещин необходимо исключить вредное воздействие водорода. Для этого перед сваркой нужно просушить электроды или флюс при температуре 300-350°С. Так же помогает термическая обработка сварного соединения после сварки, которая способствует выделению водорода из сварного шва.

1.5 Цели и задачи работы

Цель работы определить трещиностойкость металла шва сварного соединения при его охлаждении.

Задачи работы:

- 1) Определить схему нагружения;
- 2) Разработать конструкцию опытного образца;
- 3) Определить напряжения, возникающие при охлаждении металла шва;
- 4) Смоделировать сварочный процесс в ESISYSWELD;
- 5) Рассчитать трещиностойкость металла шва.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТИ СТАЛИ

2.1 Показатели трещиностойкости стали

Из условий (1 – 3) следуют соотношения (4 – 6) для определения трещиностойкости сплавов $T_c(t)$ с учетом того, что максимальное напряжение возникает в металле изделия при полном торможении усадки, когда она заканчивается при температуре окружающей среды.

$$T_c^\sigma(t) = \frac{\sigma_b(t)}{\sigma^\circ(t)}, \quad (4)$$

$$T_c^\varepsilon(t) = \frac{\delta_y(t) + \delta_n(t)}{\varepsilon^\circ(t)}, \quad (5)$$

$$T_c^A(t) = \frac{A_{3,т}(t)}{A_y^\circ(t)}. \quad (6)$$

Здесь величины $\sigma^\circ(t), \varepsilon^\circ(t), A_y^\circ(t)$ принимаются за максимальные, так как при полном торможении усадка полностью переходит в деформацию при $\varepsilon_c(t) = \varepsilon^\circ(t)$. В тоже время деформация при охлаждении сплава может быть меньше свободной усадки $\varepsilon(t) < \varepsilon_c(t)$, тогда напряжение не достигает максимально возможной величины, что гарантирует $\sigma_b(t) > \sigma^\circ(t)$ при условии равномерной деформации во всех участках.

Вновь введенные показатели трещиностойкости стали отличаются более удобной формой и четкими параметрами сплава, определяемыми известными стандартными способами. Трещиностойкость сплава больше единицы во всем диапазоне температур гарантирует отсутствие трещин при полном торможении усадки, но только в участках мало отличающихся по конструктивной прочности или в пробах (7 – 9).

$$T_c^\sigma(t) > 1, \quad (7)$$

$$T_c^\varepsilon(t) > 1, \quad (8)$$

$$T_c^A(t) > 1. \quad (9)$$

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Разрушение металла при охлаждении не противоречит условиям разрушения деталей сложных установок, где выделяются отдельные элементы. Поэтому такие показатели способствуют получению сварных швов без трещин за счет соответствующей разработки технологического процесса.

Такую роль могут выполнять элементы технологического процесса изготовления сварных швов в виде закреплений или выполнения прихваток. Чем сложнее конструкция изделия, тем вероятнее образование трещин.

Отсутствие представления о способах определения «стандартных» величин в знаменателях $\sigma^\circ(t)$, $\varepsilon^\circ(t)$, $A_y^\circ(t)$ стало «камнем преткновения» в представлениях процесса возникновения и развития внутренних напряжений, которое проходит весь исторический отрезок времени от начала изготовления первых стальных отливок и до сих пор. Известно, что в возникновении и развитии трещин в сварных швах главную роль играют внутренние напряжения. Поэтому все стремления сводились к уменьшению напряжений любыми способами, а неравномерность деформации не изучали.

Таким образом, образование трещин в отливках происходит вследствие внутренних напряжений и неравномерности деформаций по длине напряженных элементов.

2.2 Запас технологической прочности стали $T_c^\sigma(t)$

Главные показатели – запас технологической прочности и деформационной способности определяются методом испытания образцов, охлаждающихся с максимально возможных (по оборудованию) температур. Для этого определяются температурные характеристики: t_L – температуры ликвидус, t_S – температуры солидус, t_y^H – начала усадки, $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$ и $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$ – температуры начала и конца структурного превращения.

Температуры t_L и t_y^H определяются методом записи кривой охлаждения металла с жидкого состояния методом заливки проб. Температуры, фиксируемые при охлаждении образцов в твердом состоянии, определяются на dilatометре.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

По дилатометрической кривой стали определяется усадка, коэффициенты усадки в двух структурных областях для стали перлитного класса и переходной зоне, а для стали с однородной структурой, аустенитной или ферритной, определяются средние значения коэффициентов усадки.

Разрешим эту задачу известным утверждением [6, 10, 11], что в процессе образования трещин создаются участки (элементы) с разной удельной (или конструктивной) прочностью по различным причинам за счет разной скорости охлаждения – наиболее часто встречающийся случай, или за счет образования усадочных или газовых раковин и других дефектов. Быстро охлаждающиеся участки становятся «внешней силой» по отношению к медленно охлаждающимся. Такая же обстановка создается с появлением любой другой причины, снижающей удельную прочность соседнего участка. Об этом сделан вывод [13] в виде 11-ти причин образования и соответствующих им способов предотвращения трещин.

Приведенное утверждение не противоречит известным способам получения сварных швов без трещин, когда разрушение металла в процессе охлаждения шва идет за счет усадки и ее торможения. Однако в этом вопросе отдается предпочтение внешним силам, тогда как деформацию вызывает усадка, то есть уменьшение размеров элементов шва.

2.3 Методика определения трещиностойкости стали

Из пункта 2.1 и 2.2 следует, что показатели трещиностойкости определяются вычислением соотношений в числителе и знаменатели с использованием высокотемпературных параметров в температурном интервале $t_y^H - t_{20}$.

Порядок определения показателей трещиностойкости:

- Определяется химический состав стали;
- Осуществляется дилатометрия на приборах типа DIL 402C на 1300°C (по возможности, но не ниже 1000 °C);

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

- По ветви охлаждения кривой дилатометрии фиксируются и записываются в таблицу параметры $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$; $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$; t_{20} и t_{ox}^H ;

- Определяется усадка во всех структурных областях и хотя бы одна точка в зоне структурного превращения;

- Определяется временное сопротивление разрыву $\sigma_B(t)$ при температурах, соответствующих кривой дилатации образцов и принятому шагу внутри структурных интервалов;

- По кривым $\sigma(t) - dl/l_0$ определяются $E(t)$, а также $\delta_y(t)$ и $\delta_{II}(t)$ в каждом измерении температурных интервалов;

- Исследуется релаксация стали методом нагрева образца и последующего охлаждения его в заземленной состоянии с различными скоростями охлаждения;

- Определяются $\sigma^\circ(t)$ и $T_c^\sigma(t)$ и оформляются в виде таблицы.

2.4 Методика определения и использования дилатометрических характеристик в определении трещиностойкости стали

В рамках исследования была сделана дилатометрия, определены значения усадки, температура начала усадки, критические точки аустенитного перехода.

Выбор марки стали был сделан по двум признакам:

- по минимуму механической обработки;
- по распространённости использования

Химический состав был определен на установке Спектрометр МСА II механически обработанных образцов из прутков ϕ 20 мм. Химический состав исследуемой стали был занесен в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав образцов для высокотемпературных исследований

Марка стали	Содержание элементов, % масс.							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Ti
20	0,22	0,43	0,29	0,045	0,029	0,005	0,003	–

Для дилатометрии использовали образцы в виде цилиндра диаметром 3,0 мм и длиной 25-30 мм.

По рисунку (см. рис. 2.1) дилатометрических исследований определяют температурные коэффициенты усадки.

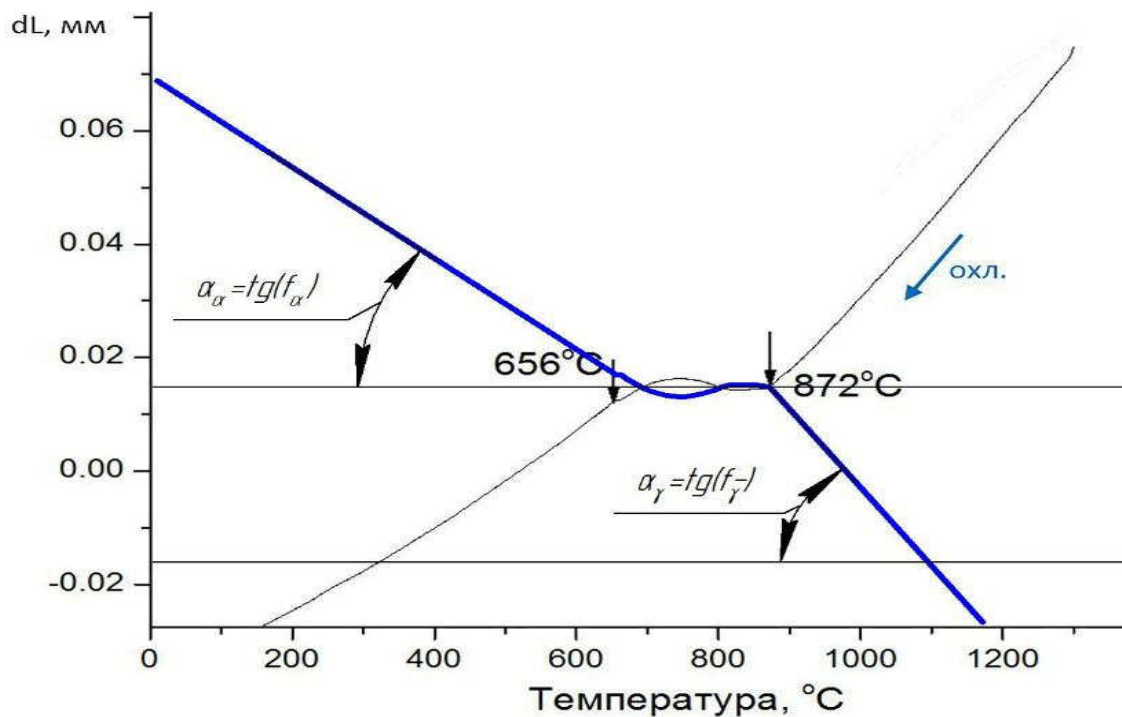


Рисунок 2.1 – Сталь 20 скорость охлаждения 3 °C/мин. для образца с рабочей частью $L_0=7$ мм

Определение температуры начала усадки инструментальными методами с использованием дилатометров или комплекса GleebleSystem 3800 затруднительно вследствие невозможности нагреть образец свыше 1300°C для дилатометра и коробления образца на GleebleSystem 3800. Поэтому предлагается использовать экстраполяцию для определения температуры начала усадки.

Полученные дилатометрические параметры стали занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Дилатометрические параметры сталей

№ п/п	Марка стали	Температура, °C				Значения усадки $dL/L_0 \cdot 10^3$, ед.			
		t_{ox}^H	$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$	$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$	t_D^K	$\varepsilon(t_D^H)$	$\varepsilon(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H)$	$\varepsilon(t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K)$	$\varepsilon(t_D^K)$
1	20	1300	872,0	750,0	160	10,714	1,571	2,338	-3,884

Температура солидус и ликвидус вычислялась с использованием возможностей программного комплекса Procast, в котором она рассчитывалась по заданному химическому составу. Данная температура практически совпала со справочными данными и была принята нами для дальнейшего расчета.

Таблица 2.3 – Расчетные значения температуры начала усадки t_y^H

№ п/п	Марка стали	Свободная усадка $\varepsilon_c(t)$, %	t_S , °C	t_L , °C	t_y^H , °C
					Рассчитанная как средняя между t_L и t_S
1	20	2,1	1476	1516	1496

Согласно А.А. Бочвару [2] достоверная температура начала усадки лежит в интервале кристаллизации между температурами солидус и ликвидус. Этот постулат был принят в качестве точки отсчета температуры начала усадки во всех последующих расчетах.

2.5 Высокотемпературные испытания образцов на растяжение

Образцы нагревали до температуры 1300 °C, выдерживали 10с и испытывали или медленно охлаждали до тех температур, при которых намечены испытания с ориентиром дилатометрической кривой охлаждения. Для защиты от окисления использовался вакуум с давлением $1 \cdot 10^{-1}$ мм.рт.ст. или 0,00013 атм.

Обязательными температурами для испытаний образцов в соответствии с их дилатацией были температуры $t_{ox}^H=1300^\circ\text{C}$; $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$, $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$ и t_{20} . В температурных интервалах $t_{ox}^H - t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$ и $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H - t_{20}$ точки испытаний располагались через 100 – 200 °C так, чтобы в каждом интервале получить не менее трех точек.

Испытания проводили на комплексе GleebleSystem 3800 при температурах от 1300 до 20°C, причем образец сначала нагревали до 1300 °C, а затем охлаждали до заданных температур с разными скоростями, после чего проводили испытания на растяжение. Результаты сведены в таблицу 2.4. Графически данные значения из таблицы 2.4 представлены на рис.2.2.

Таблица 2.4 – Результаты высокотемпературных испытаний на GleebleSystem 3800

Марка стали	Параметр, ед.изм.	Величина параметра при температуре, °С						
		t_{1300}	–	$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$	$t_{\gamma \rightarrow \alpha}^K$	–	–	t_{20}
20	Фактическая температура, °С	1300	1000	872	630	400	200	20
	$\sigma_B(t)$ при нагреве, МПа	16	60	79	206	471	506	520

Для испытаний использовали образцы, показанные на рис. 2.2. Нагрев осуществляется путем пропускания через образец тока. Базой для расчетов принята длина 10 мм. К образцу припаиваются 3 термопары, по которым идет контроль температуры.

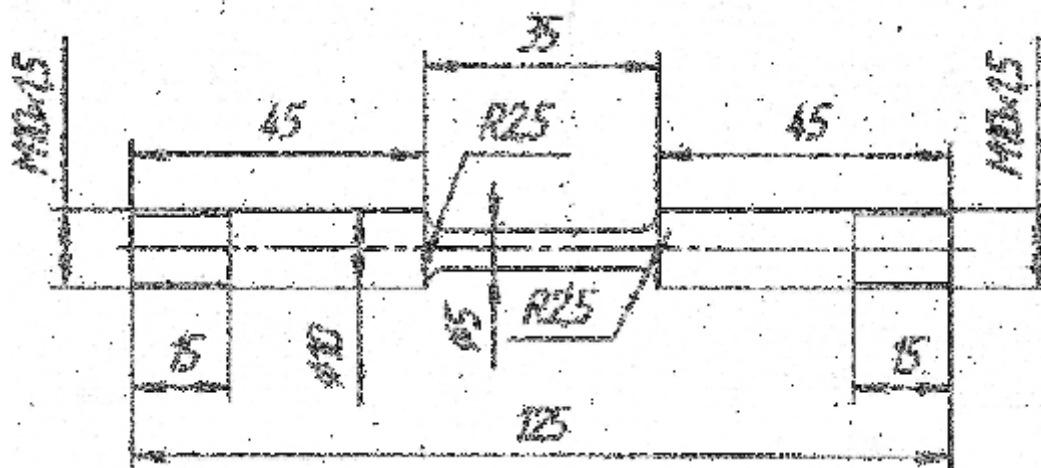


Рисунок 2.2 – Образец для испытаний на GleebleSystem3800

2.6 Испытания на релаксацию

Релаксацию напряжений на GleebleSystem 3800 исследовали методом нагрева образцов до температуры 1300°С и выдержки при этой температуре 1 мин. Нагрев происходил при свободных держателях. Затем в заземленном состоянии образец охлаждали со скоростями 0,05; 0,1; 1; 2; 4; 12; 24 °С/с. Результаты этих исследований приведены на рис.2.3 и в таблице 2.5.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

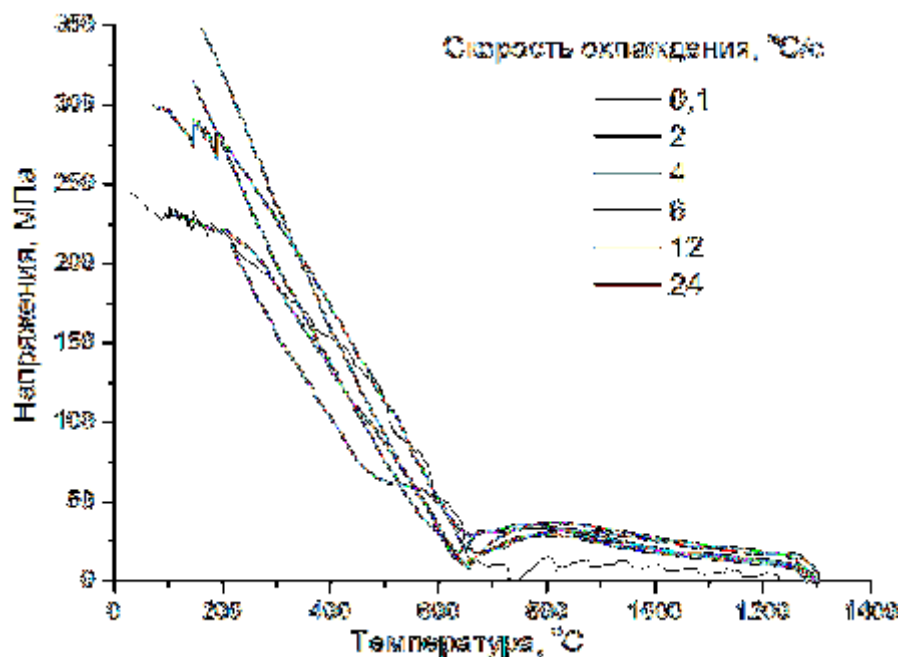


Рисунок 2.3 – Испытание на релаксацию

Таблица 2.5 – Уровень напряжений $\sigma^\circ(t)$ при испытаниях образцов на релаксацию при различных скоростях охлаждения

Марка стали	$V_{ох}, \text{ }^\circ\text{C/c}$	Напряжения (МПа) при температурах, $^\circ\text{C}$													
		1300	1200	1100	1000	900	800	700	650	600	500	400	200	20	
20	0,1	7.1	10.7	12.9	15.7	16.4	15	5	16	52	113	153	220	245	
	2	35.3	53.3	40.4	43.0	46.2	31	19	19	52	113	173	278	309	
	4	37.2	56.2	44.6	45.5	50.2	37	30	18	34	88	134	220	245	
	6	21.0	31.7	28.3	29.8	35.8	29	20	9	30	75	138	275	405	
	12	24.9	37.6	30.9	34.7	41.7	34	25	9	36	93	158	320	–	
	24	24.9	37.6	32.9	33.1	38.0	34.5	32	28	48	63	103	224	338	

Этим способом можно определять трещиностойкость любой стали чугуна и цветных металлов, достаточно определить $\sigma_B(t)$ и $\sigma^\circ(t)$ при скоростях охлаждения близких к режиму охлаждения сварного шва, а также установить температуру начала усадки.

2.7 Определение показателей трещиностойкости стали 20 с учетом релаксации напряжений

Рассчитаем трещиностойкость стали по выражению (4). Результаты сведены в табл. 2.6.

На рис. 2.4 представлены результаты расчета трещиностойкости стали по напряжениям $T_c^\sigma(t)$ (см. табл. 2.6). Для расчета использованы значения напряжений в образце при полном торможении усадки при охлаждении с различными скоростями.

При сварке сложных профильных деталей часто используют жесткое закрепление свариваемых кромок для уменьшения коробления детали. Для такого закрепления релевантны результаты лабораторных испытаний, имитирующих заземленное состояние.

Дополнительные растягивающие нагрузки при сварке маловероятны, так как область сварного шва незначительна, относительно детали, к тому же деталь жестко закреплена. Однако, несмотря на это, в сварных соединениях часто обнаруживаются трещины даже для группы хорошо свариваемых сталей. Это связано с высокими скоростями охлаждения (до $100^\circ\text{C}/\text{с}$), которые достигаются при сварке большой толщины. В этом случае инструкции по сварке говорят о необходимости введения предварительного подогрева для снижения скорости охлаждения. В нашей работе график трещиностойкости построен для скоростей охлаждения вплоть до $24^\circ\text{C}/\text{мин}$. В дальнейшем, для реализации данного алгоритма определения трещиностойкости сварных соединений необходимо проведение испытаний на релаксацию и на разрыв при скоростях охлаждения до $100^\circ\text{C}/\text{с}$. Физический комплекс GleebleSystem 3800 позволяет это сделать.

Полученные результаты трещиностойкости показывают, что трещины могут образовываться в сварных швах при превышении некоторой скорости охлаждения при условии жесткого закрепления. При сварке средняя скорость выше $1^\circ\text{C}/\text{с}$. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об возможном образовании трещин при сварке. Однако, при сварке детали часто подвержены формоизменению (короблению), что снижает возникающие напряжения и предотвращает образование трещин.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Таблица 2.6 – Трещиностойчивость стали $T_c^\sigma(t)$ при скоростях охлаждения 0,05; 0,1; 1; 2; 4; 6; 12; 24 °C/c

Марка стали	$V_{ох},$ °C/c	Трещиностойчивость (ед.) при температуре, °C						
		T, °C	1300	1000	872	630	400	200
20	0,1	2.24	3.82	4.94	6.78	3.08	2.30	2.12
	2	0.45	1.40	1.88	6.40	2.72	1.82	1.68
	4	0.42	1.32	1.70	8.44	3.51	2.30	2.12
	6	0.75	2.02	2.33	11.84	3.41	1.84	1.28
	12	0.63	1.73	2.00	10.40	2.98	1.58	1.30
	24	0.63	1.81	2.13	5.72	4.57	2.26	1.54

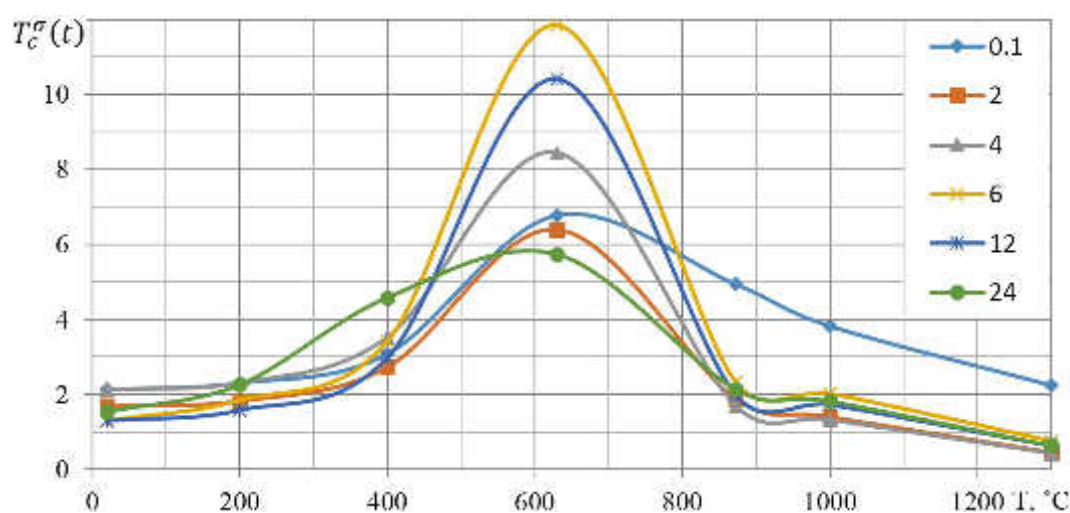


Рисунок 2.4 – Трещиностойчивость стали 20

Таким образом, учитывая результаты релаксации (см. табл.2.6), запас технологической прочности, то есть трещиностойчивость стали, возрастает в переходной зоне, а затем снижается в ферритно-перлитной области. Наивысшие значения напряжений возникают в образцах при двух температурах $t_{\gamma \rightarrow \alpha}^H$ и 20°C. Однако их уровень не превышает временное сопротивление разрыву $\sigma_B(t)$. Наиболее опасный период для образования трещин, находится при температуре начала усадки.

Анализом приведенных результатов исследований свойств сплава установлено, что основой трещиностойкости является запас технологической прочности $T_c^\sigma(t)$.

Это касается обычных сталей, используемых в сварке. Надо полагать, что стали с высокой износостойкостью и, следовательно, твердостью, к такой характеристике не относятся. Требуется специальные исследования для уточнения.

Для определения трещиностойкость сварного соединения с учетом режима сварки, условий закрепления и геометрии сварной конструкции, мы воспользуемся моделированием процесса сварки пробы «Теккен» и предложенной нами пробы «ОиТСП 01» в программе ESI SYSWELD, что и будет сделано в следующей глава.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

3 ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Для того чтобы определить трещиностойкость сварного соединения воспользуемся формулой (10).

$$T_o^\sigma(t) = \frac{\sigma_B(t)}{\sigma(t)} \quad (10)$$

Рассмотрим следующие технологические пробы и определим в них напряжения.

3.1 Моделирование технологической пробы «Теккен» для оценки склонности металла к образованию трещин в программе ESI SYSWELD

Проба «Тэккен» [ГОСТ 26388-84] плоский прямоугольный образец толщиной (δ 12..40 мм с продольной прорезью в центре, оформленной в виде V-образной разделки (рис. 3.1)). Образец сваривается в свободном состоянии и выдерживается после сварки 20 ч. Трещины образуются в корневой части сварного соединения под действием высоких усадочных напряжений. Обязательное условие работы пробы - непровар в корне шва, который служит концентратором напряжений. Наличие трещин выявляется различными методами контроля, в том числе и протравливанием раствором азотной кислоты с последующим изломом образца.

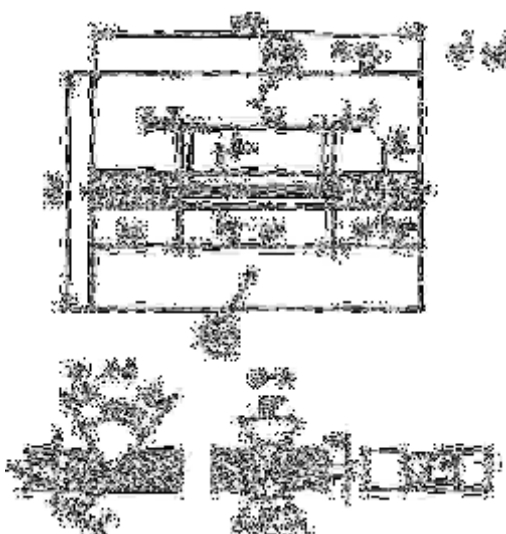


Рисунок 3.1 – Проба «Тэккен»

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

При образовании трещин в качестве дополнительного сравнительно-количественного показателя склонности к холодным трещинам принимают процентное отношение суммарной длины трещины к длине шва или относительной площади трещины к площади продольного сечения шва. За количественный показатель стойкости против трещин принимают температуру подогрева, при которой уже не образуется трещин.

Чтобы создать модель и выполнить моделирование в программе ESI SYSWELD необходимо:

1. Создать сетку моделируемой детали;
2. Задать условия закрепления детали;
3. Создать коллекторы (зоны) сварного шва, зоны термического влияния, основного металла;
4. Указать траекторию сварки;
5. Задать свойства материала и параметры режима сварки;
6. Отправить данные на расчет;
7. Просмотреть результаты моделирования.

Для создания сетки необходимо войти в раздел «MESH» и при помощи функций 1D и 2D создать и скорректировать необходимую нам сетку (рис.3.2).

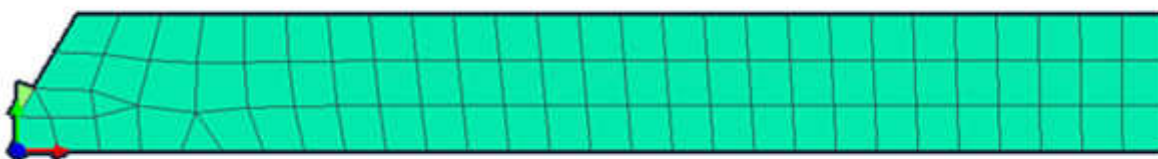


Рисунок 3.2 – Модель сетки

После того как мы создали необходимую нам сетку, с помощью функции 3D выдавливаем модель на необходимое нам расстояние. Готовая 3D модель сварочной пробы выглядит следующим образом (рис 3.3).

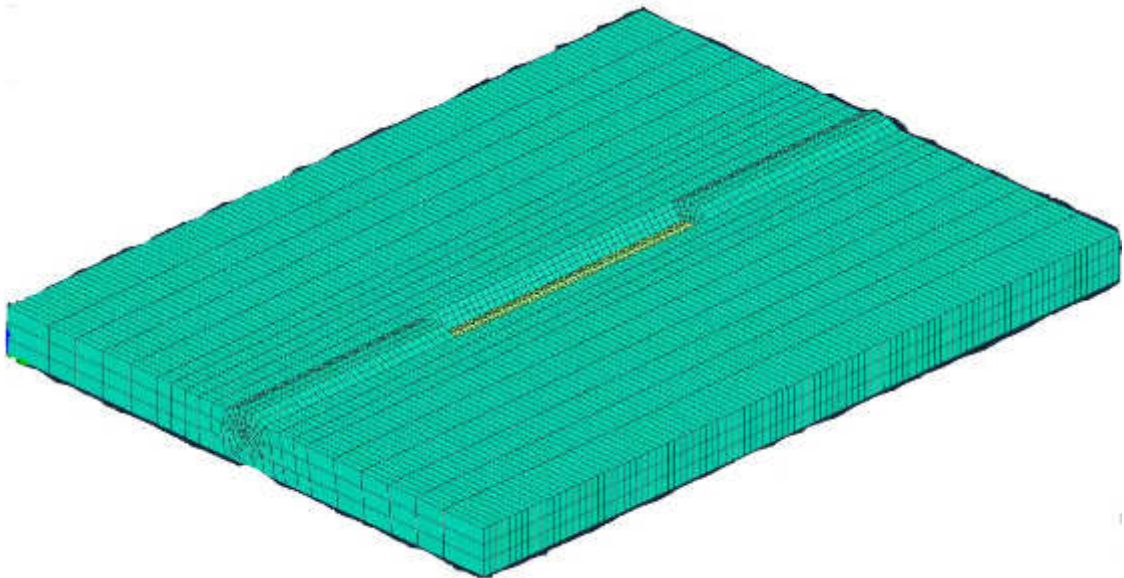


Рисунок 3.3 – Модель сварочной пробы «Теккен»

Далее отдельно выделяя элементы, задаем необходимые нам коллекторы (основной металл, ЗТВ, сварной шов) и условия закрепления. На этом заканчиваются наши действия в разделе «MESH» и мы переходим в раздел «WELD», где в меню «Welding» при помощи функции «WeldingAdvisor» задаем траекторию сварки, свойства материалов, и параметры режима сварки (рис. 3.4).

Weld Line	Weld Pool	Energy	Weld Line	Weld Pool	Energy
Heat Source:	ARC		*Energy/Unit length:	4200.000	
*Velocity:	30.000		*Efficiency:	1.000	
*Initial Time:	0.000		Power Ratio:	1.200	
End Time:	60.000		Length Ratio:	0.500	
Estimated			<input type="checkbox"/> Start/End Energy Ramp		
*Length:	7.000				
*Width:	3.000				
*Penetration:	2.000				

Рисунок 3.4 – Задание параметров режима сварки

Закончив с выбором параметров, отправляем задачу на расчет при помощи функции «ComputationManager», которая тоже находится в меню «Welding».

Для просмотра и анализа результатов используют раздел «Viewer». Для просмотра необходимо открыть рассчитанный ранее файл и с помощью меню «Results» начать работу с файлом.

Вид теплового поля и распределения напряжений показаны на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно.

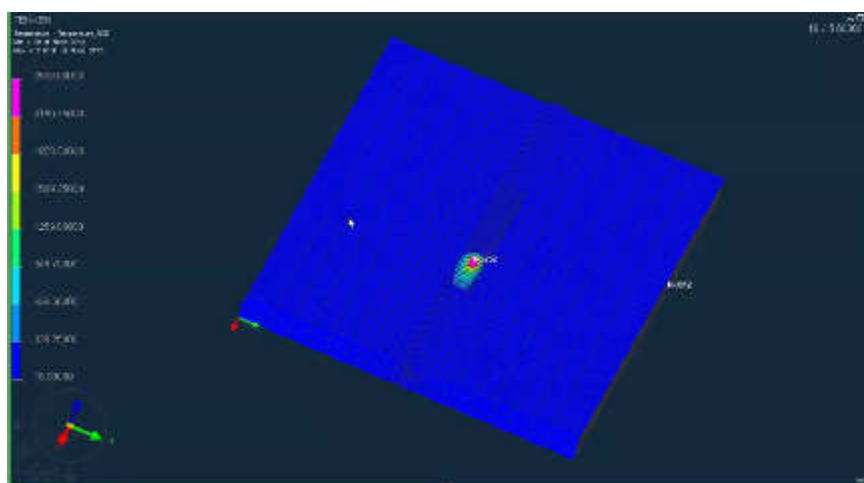


Рисунок 3.5 – Тепловое поле в пробе «Теккен»

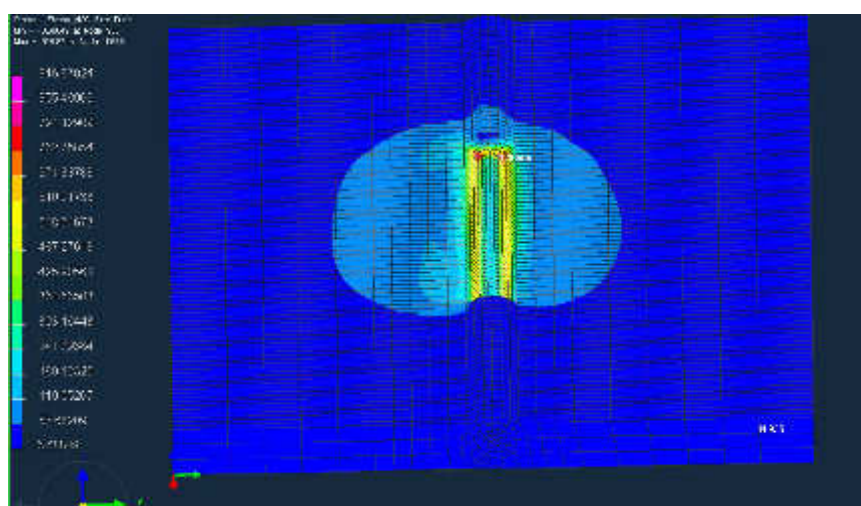


Рисунок 3.6 – Распределение напряжений в пробе «Теккен»

3.2 Разработка новой технологической пробы «ОиТСП 01»

Для расчета трещиностойчивости конструкции разработаем собственную пробу «ОиТСП 01». Это плоский прямоугольный образец толщиной (δ 12 мм V-образной разделкой кромок под 60° (рис.3.7) собранная в стык).

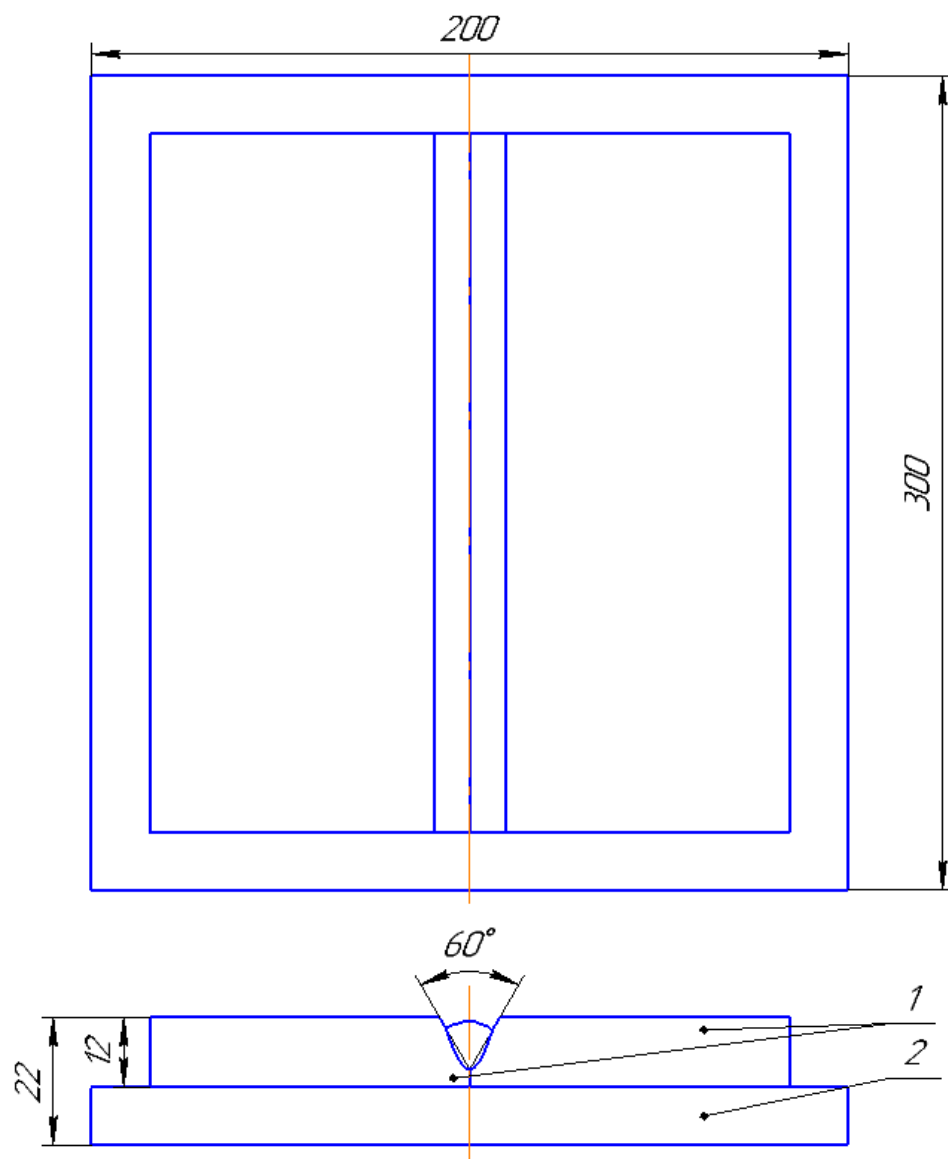


Рисунок 3.7 – Схема пробы «ОиТСП 01»

Проба состоит из двух частей:

- 1) Сварная пластина (125x300x12мм)
- 2) Пластина основания (250x350x12мм)

Образец сваривается в зажатом состоянии, которое достигается при помощи сварки сварной пластины и пластины основания по средствам прихваток (рис.3.8).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

28



Рисунок 3.8 – Натуральная проба «ОиТСП 01»

Сварочный режим, используемый при проведении натурального эксперимента:

- 1) $I = 185 \text{ A}$
- 2) $U = 24 \text{ В}$
- 3) $t = 60 \text{ с}$
- 4) $V_{\text{св}} = 30 \text{ см/м}$
- 5) $V_{\text{под}} = 6,5 \text{ м/мин}$

В качестве основного материала была выбрана исследуемая конструкционная углеродистая качественная сталь 20. Химический состав указан в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав в % материала сталь 20

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.17 - 0.24	0.17 - 0.37	0.35 - 0.65	< 0.3	<0.04	< 0.035	< 0.25	< 0.3	< 0.08

В качестве присадочного материала использовалась сварочная проволока ESAB 308LSIØ1,2 мм. Химический состав указан в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Химический состав в % материала ESAB 308LSI

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	C	Si
< 0,03	0,8	1,8	20	10	0,1	0,1	< 0,03	0,8

Сварочную пробу «ОиТСП 01» так же моделируем в программе ESI SYSWELD по методике описанной пунктом выше. Сварочный режим и материалы используем, как и при моделировании пробы «Теккен».

3.3 Анализ результатов исследования технологической пробы «ОиТСП 01»

Результатом проделанной работы были исследования, проведенные в лаборатории оптической микроскопии ЮУрГУ.

Целью данного исследования было установка актуальности и работоспособности разработанной нами пробы. Результатами являются снимки, сделанные при помощи микроскопа (рис.3.9).

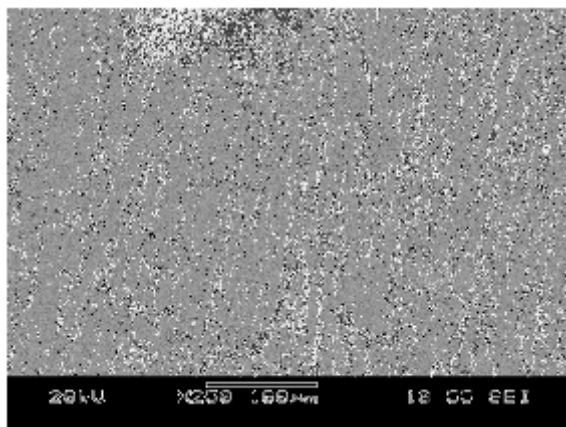


Рисунок 3.9 – Снимок микроскопа с трещиной

После исследования снимков было установлено, что трещина располагается в зоне сплавления металлов. На это нам указывает содержание легирующих элементов в металле шва. На рисунке 3.10 показано распределение легирующих элементов (Ni– слева, Cr – справа).

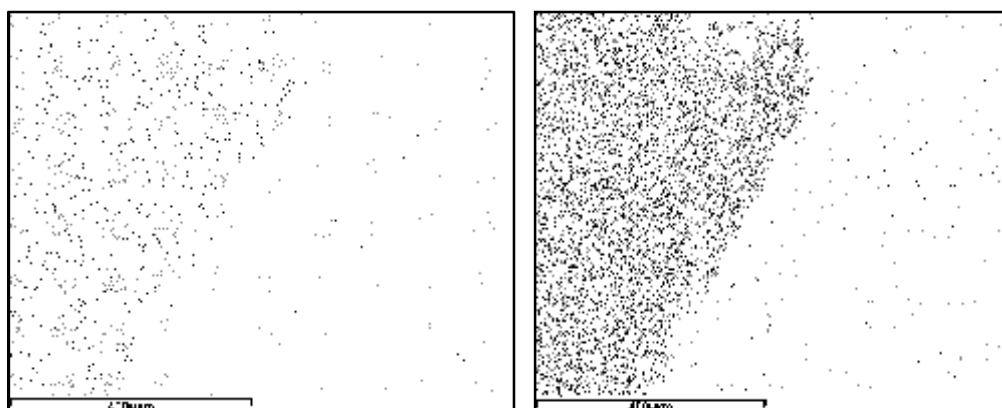


Рисунок 3.10 – Распределение легирующих элементов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

30

В результате проведения натурального эксперимента было выявлено, что подобранный сварочный режим способствует образованию трещин. Для более достоверных результатов по оценке работы технологической пробы необходимо повторить эксперимент с теми же материалами, но на другом режиме и аналогичным образом провести микроструктурные исследования с целью выявления трещин в зоне сплавления металлов.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ESI SYSWELD

4.1 Анализ пробы «Теккен»

В рамках анализа пробы «Теккен» в качестве исследуемых точек сварного соединения брались точки (рис. 4.1):

- 1) В центральной части шва;
- 2) В корне шва;
- 3) В зоне сплавления металлов.

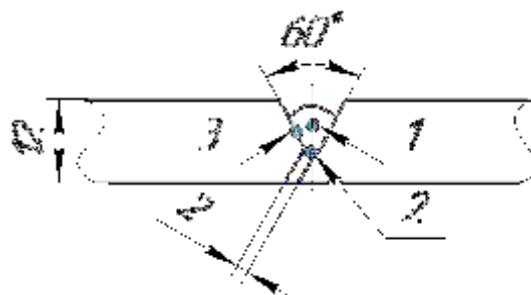


Рисунок 4.1 – Исследуемые точки пробы «Теккен»

Для этих точек были построены кривые зависимости возникающих напряжений от температуры при охлаждении металла в зоне сварного соединения. Графики читать справа налево. В качестве исследуемых областей было выделено три области:

- 1) Середина сварного соединения;
- 2) Начало сварного соединения;
- 3) Конец сварного соединения.

1. Зона исследования середина сварного шва. На рисунках 4.2, 4.3, 4.4, изображены кривые охлаждения в зоне сплавления металлов (1а), в центральной части шва (2а) и корне шва (3а). На рисунке 4.5 показано распределение кривых в середине сварного соединения.

2. Зона исследования начало сварного шва. На рисунках 4.6, 4.7, 4.8 показаны кривые охлаждения в центральной части шва (1б), зоне сплавления металлов (2б) и корне сварного шва (3б).

3. Зона исследования конец сварного шва. На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 показаны кривые охлаждения в центральной части шва (1в), зоне сплавления металлов (2в) и корне шва (3в).

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

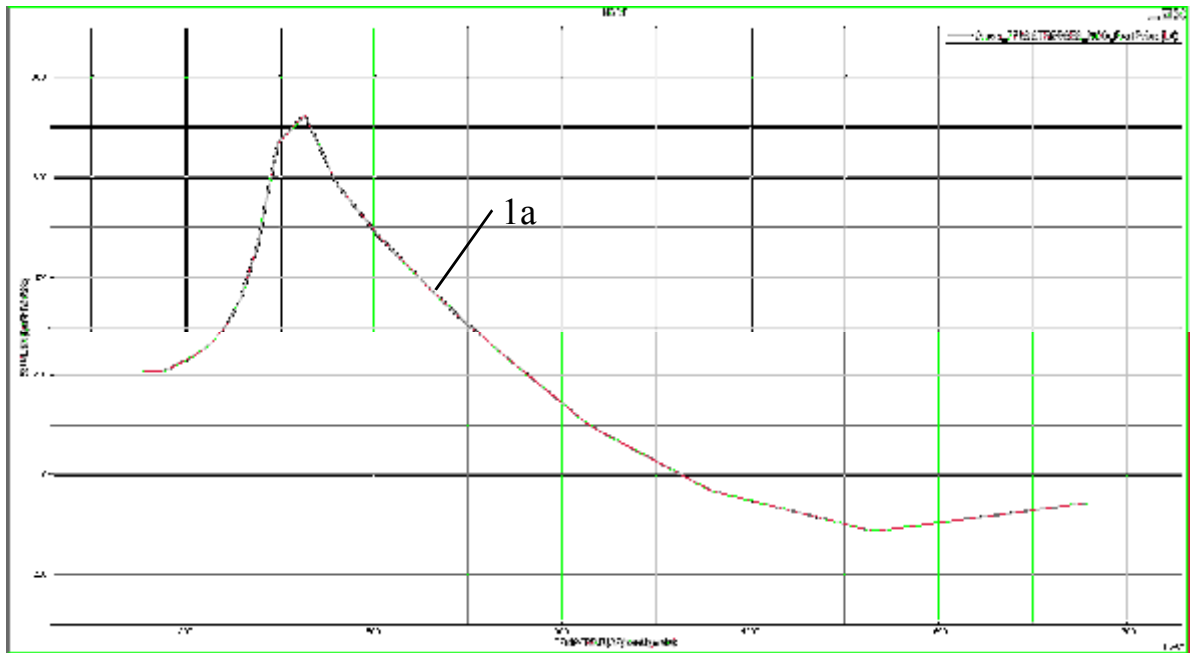


Рисунок 4.2 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования
середина сварного соединения

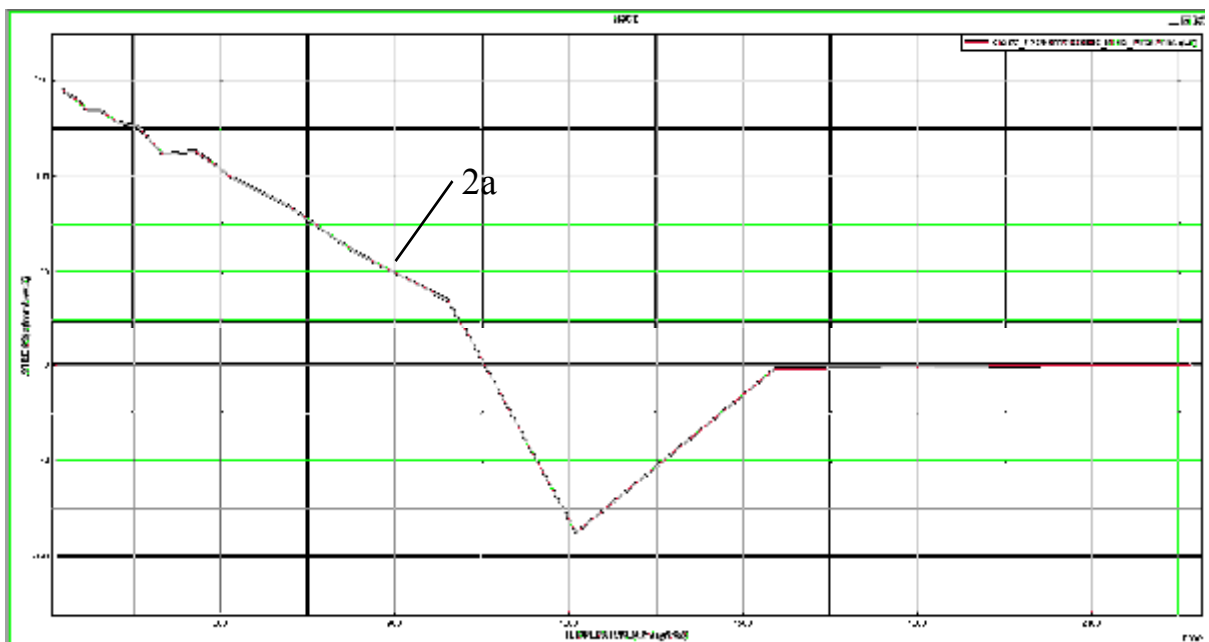


Рисунок 4.3 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования середина
сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

33

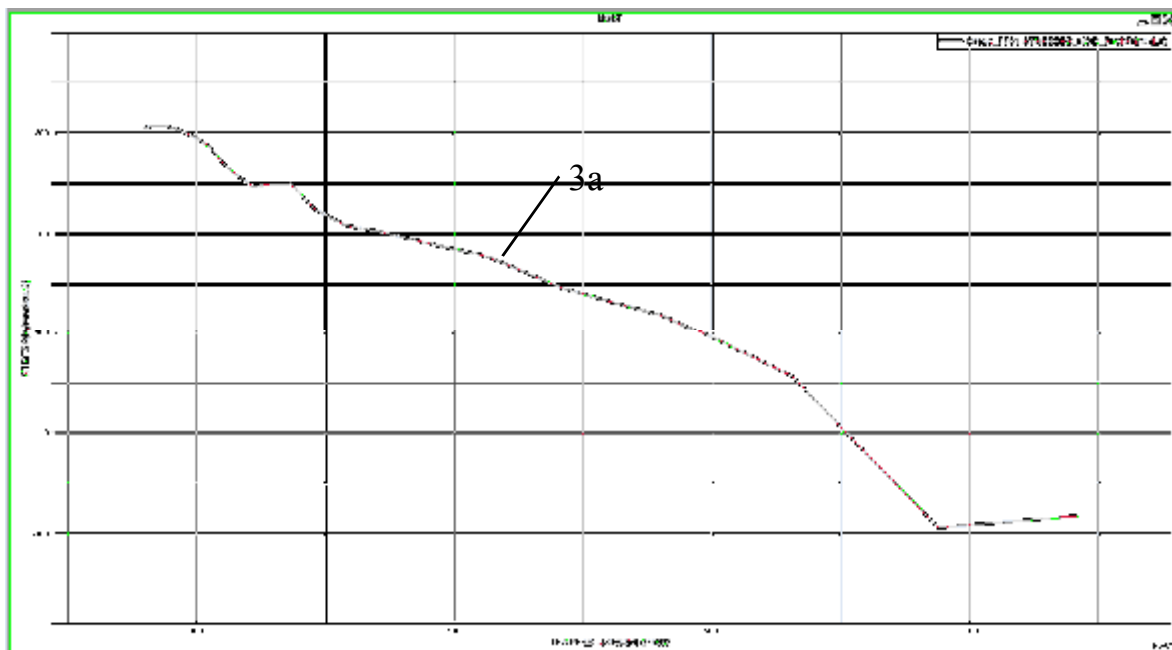


Рисунок 4.4– Напряжения в корне сварного шва. Зона исследования середина сварного соединения

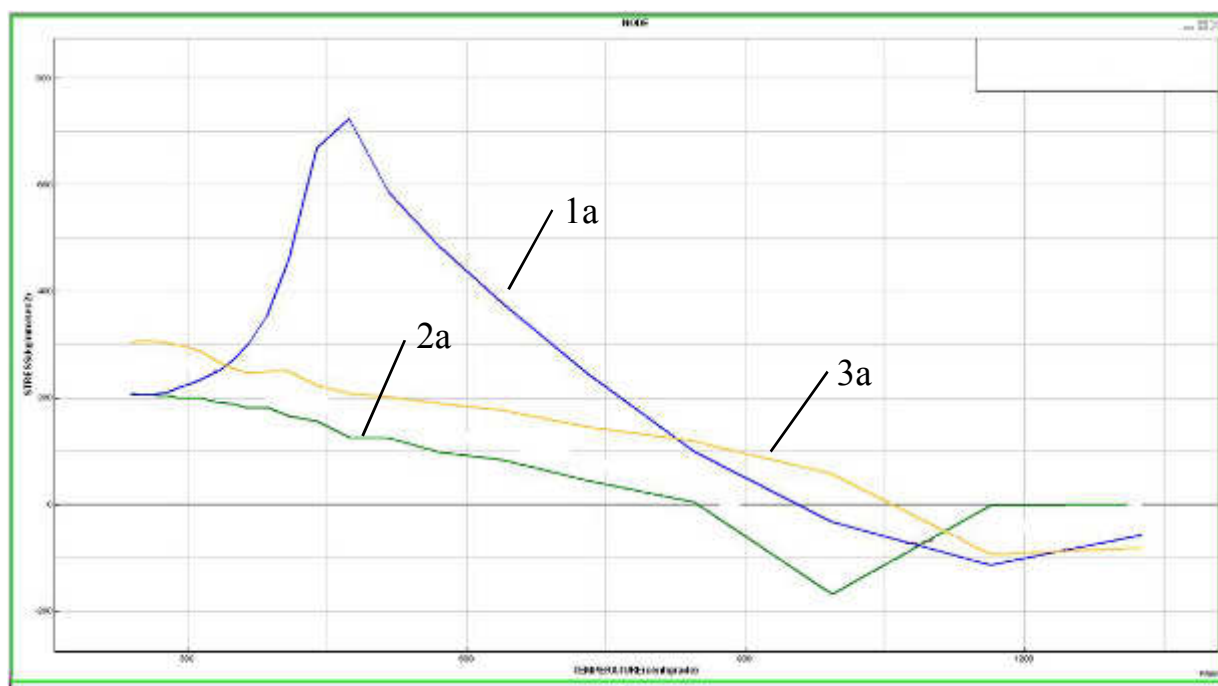


Рисунок 4.5 – Распределение кривых охлаждения в середине сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

34

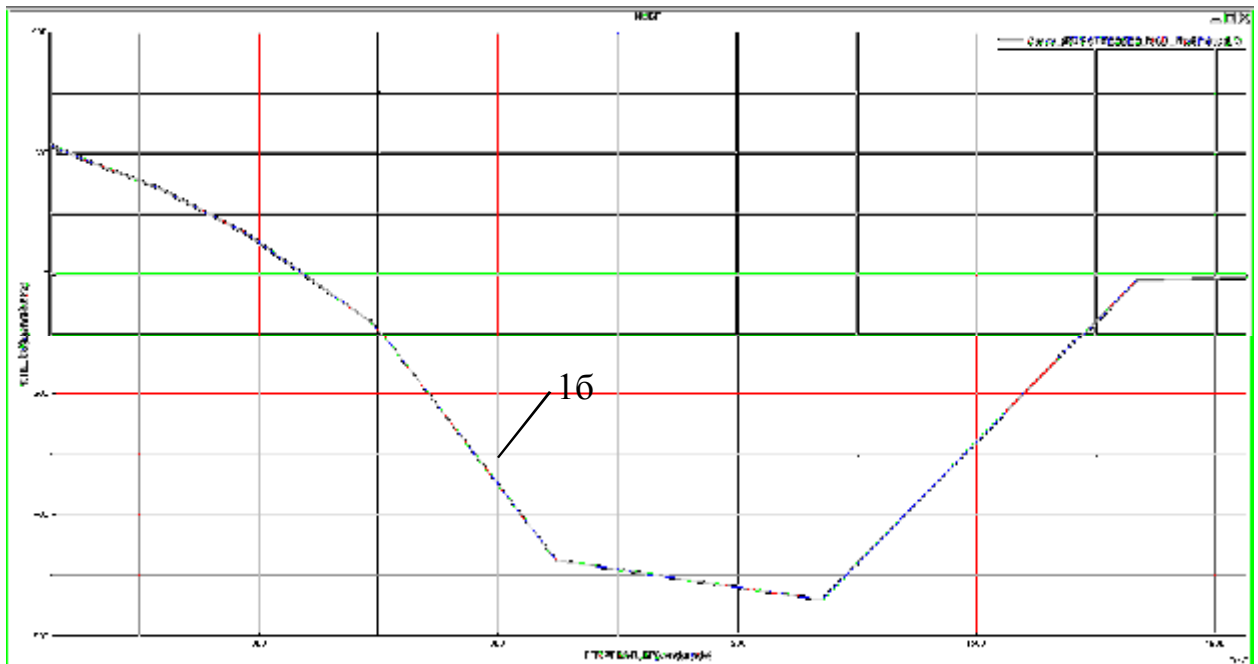


Рисунок 4.6 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования начало сварного соединения

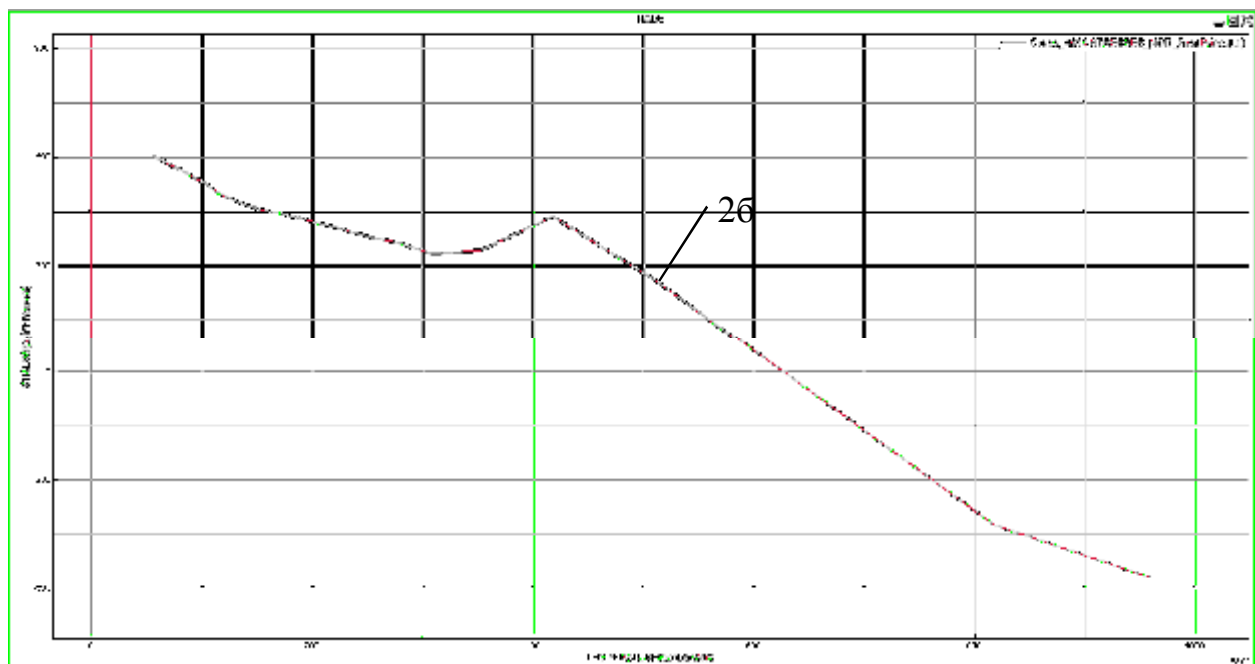


Рисунок 4.7 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования начало сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

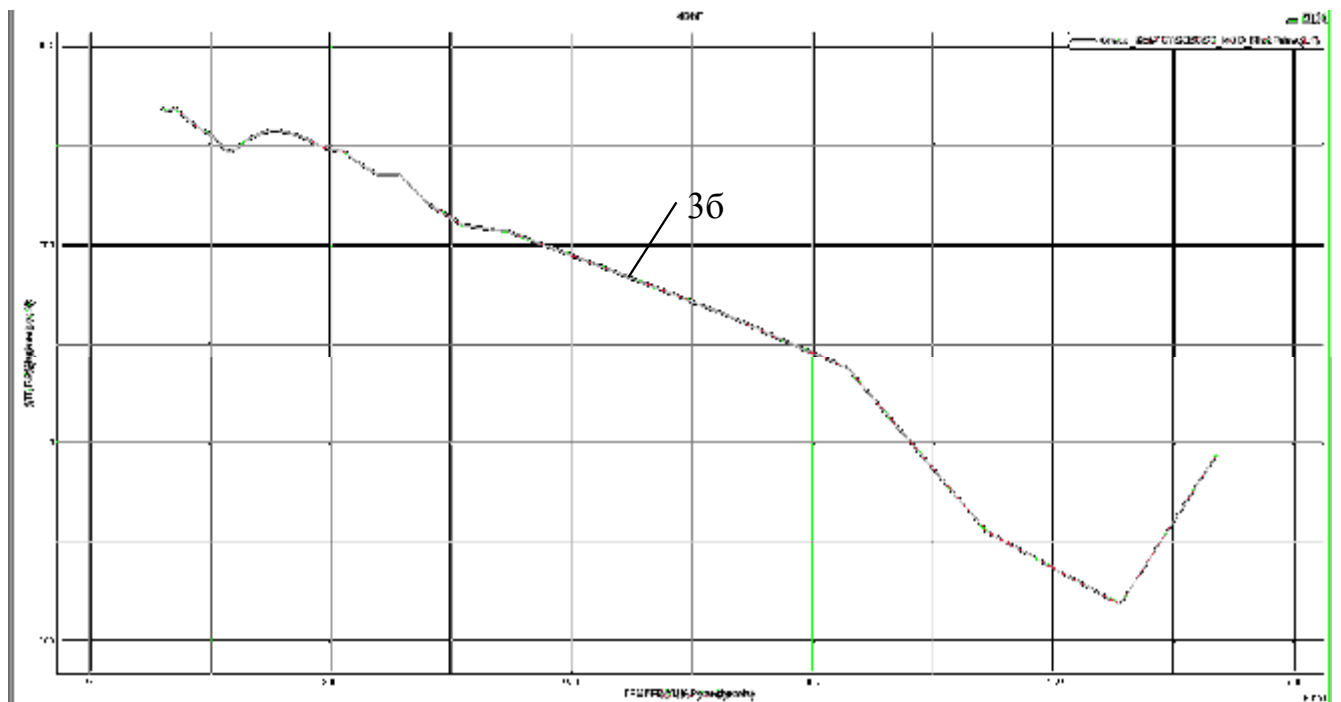


Рисунок 4.8 – Напряжения в корне сварного шва. Зона исследования начало сварного соединения

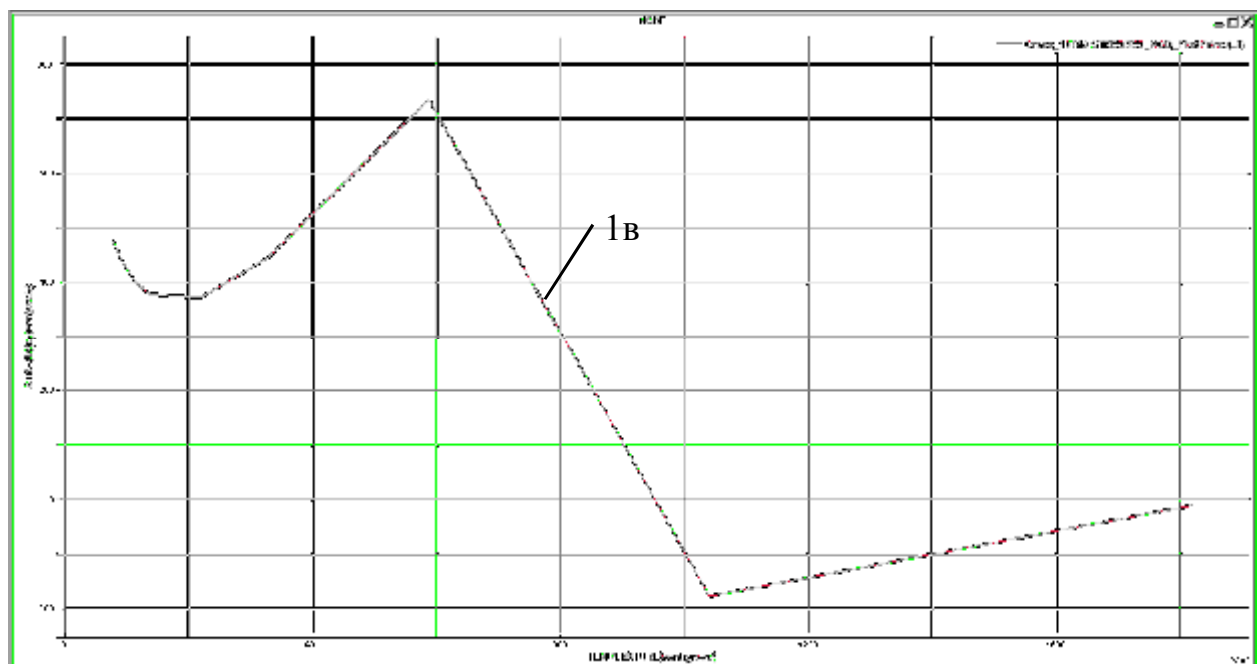


Рисунок 4.9 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования конец сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

36

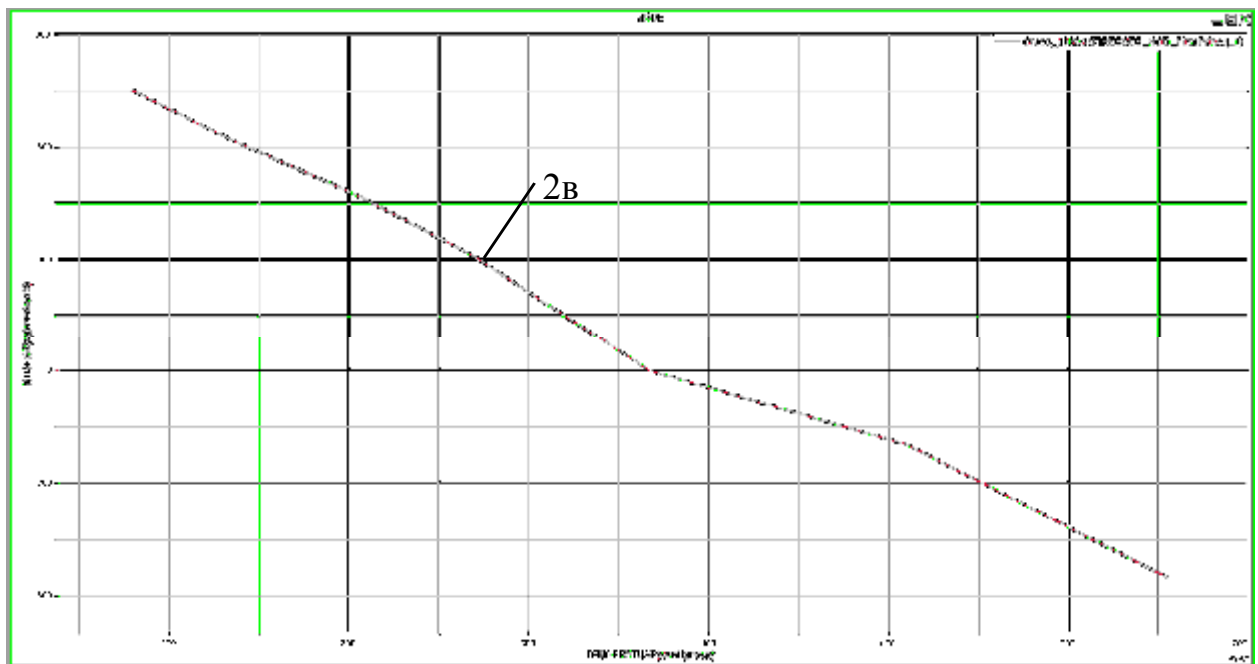


Рисунок 4.10 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования
конец сварного соединения

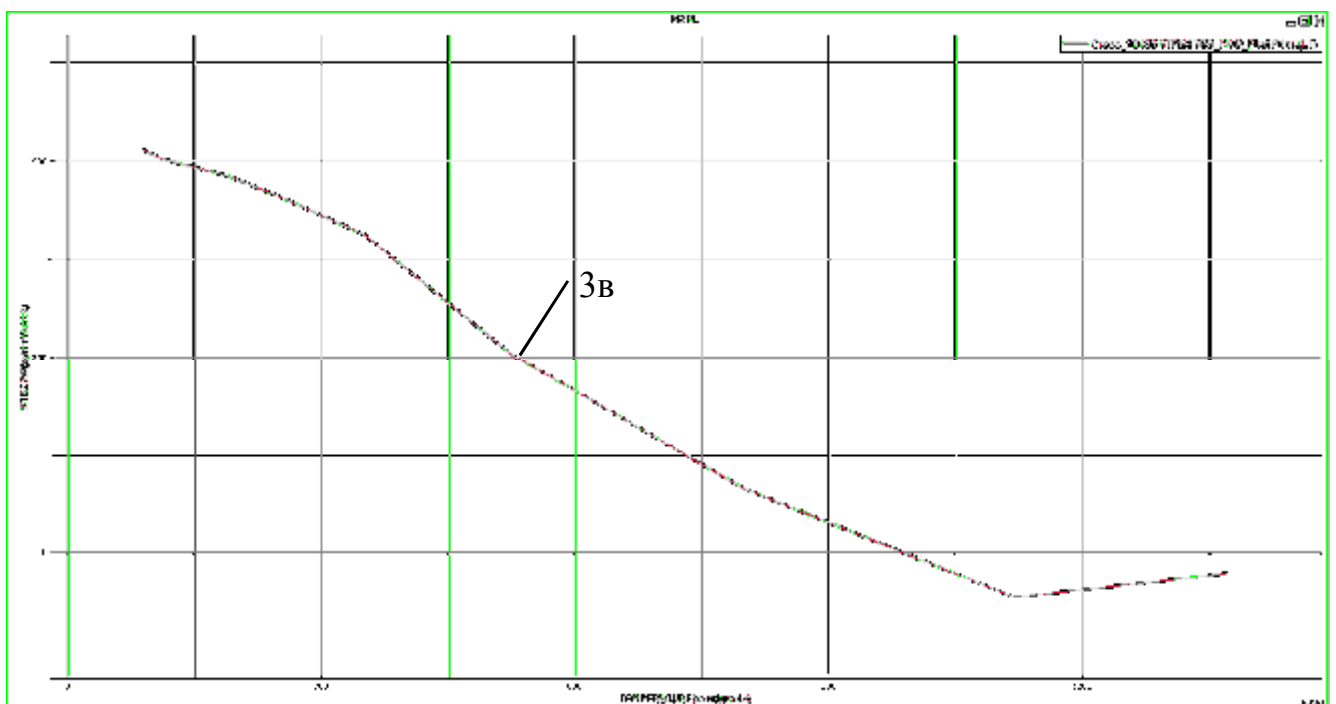


Рисунок 4.11 – Напряжения в корне сварного шва. Зона исследования конец
сварного соединения

4.2 Анализ пробы «ОиТСП 01»

Аналогичным образом проводим анализ пробы «ОиТСП 01». В качестве исследуемых точек сварного соединения брались точки (рис. 4.12).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

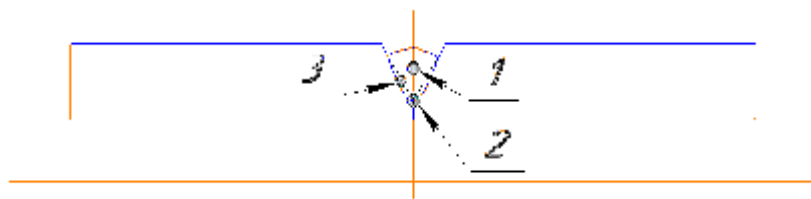


Рисунок 4.12 – Исследуемые точки пробы «ОиТСП 01»

1. Зона исследования середина сварного шва. На рисунках 4.13, 4.14, 4.15, изображены кривые охлаждения в центральной части шва (1г), зоне сплавления металлов (2г), и корне шва (3г).

2. Зона исследования начало сварного шва. На рисунках 4.16, 4.17, 4.18 показаны кривые охлаждения в центральной части шва (1д), зоне сплавления металлов (2д) и корне сварного шва (3д).

3. Зона исследования конец сварного шва. На рисунках 4.19, 4.20, 4.21 показаны кривые охлаждения в центральной части шва (1е), зоне сплавления металлов (2е) и корне шва (3е).

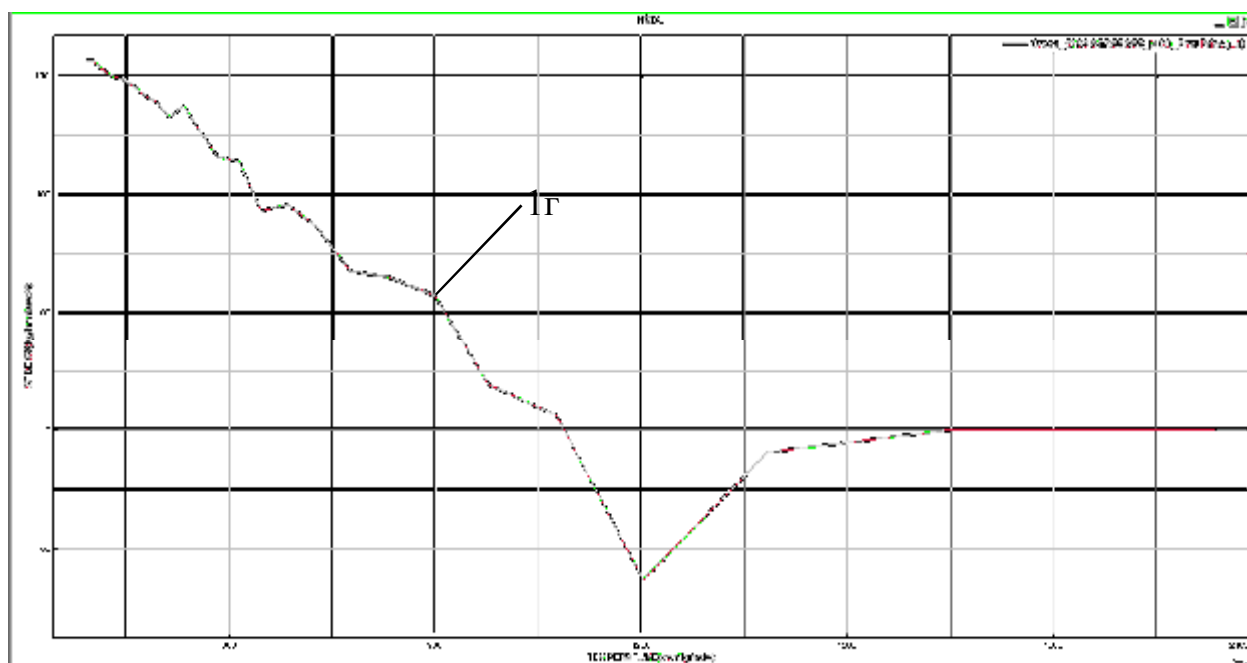


Рисунок 4.13 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования середина сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

38

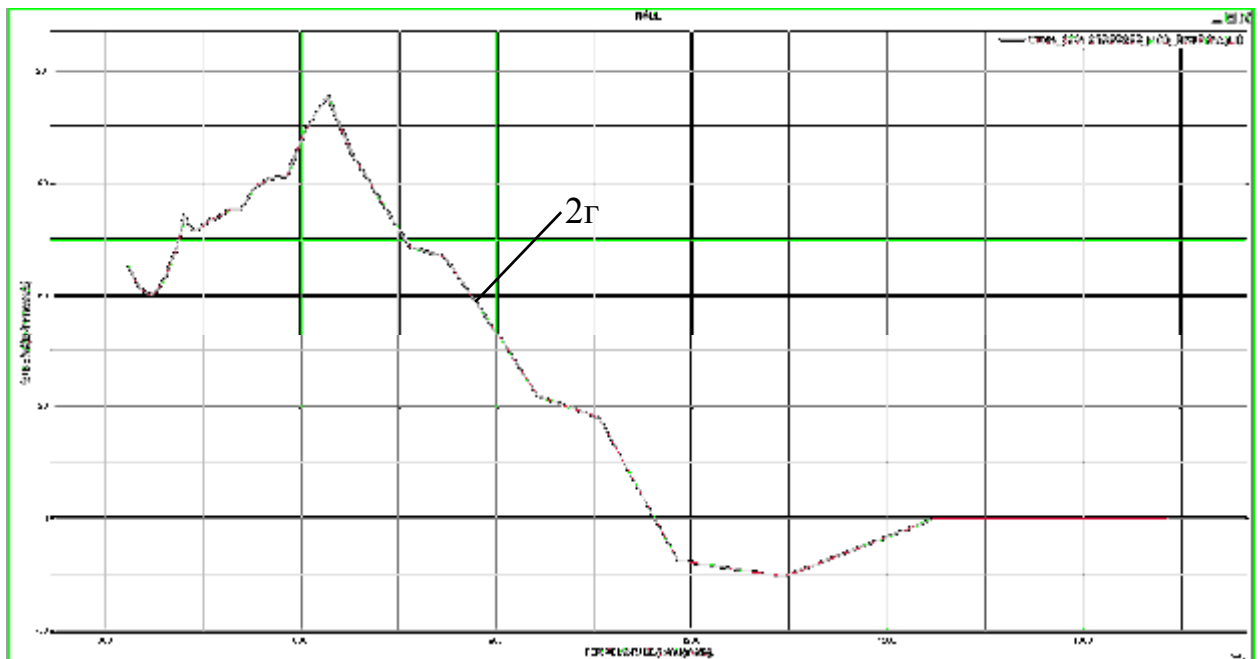


Рисунок 4.14 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования
середина сварного соединения

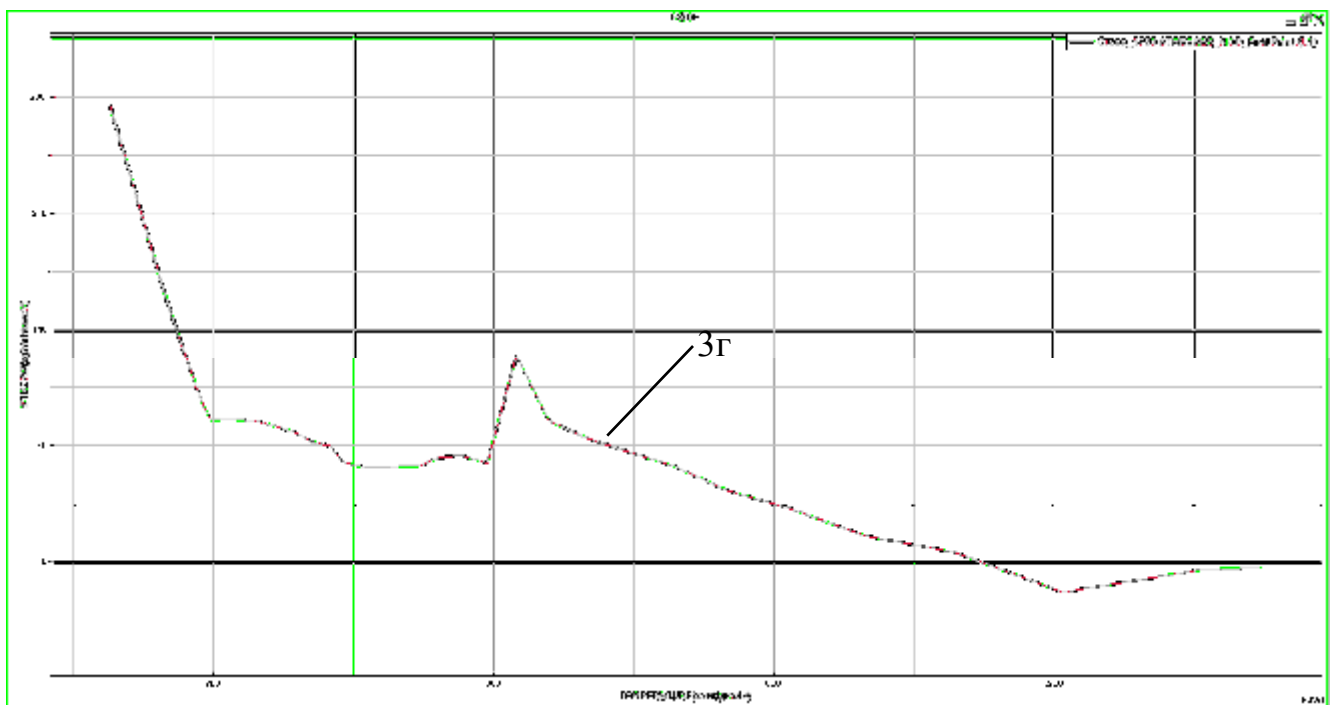


Рисунок 4.15 – Напряжения в корне сварного шва. Зона исследования середина
сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

39

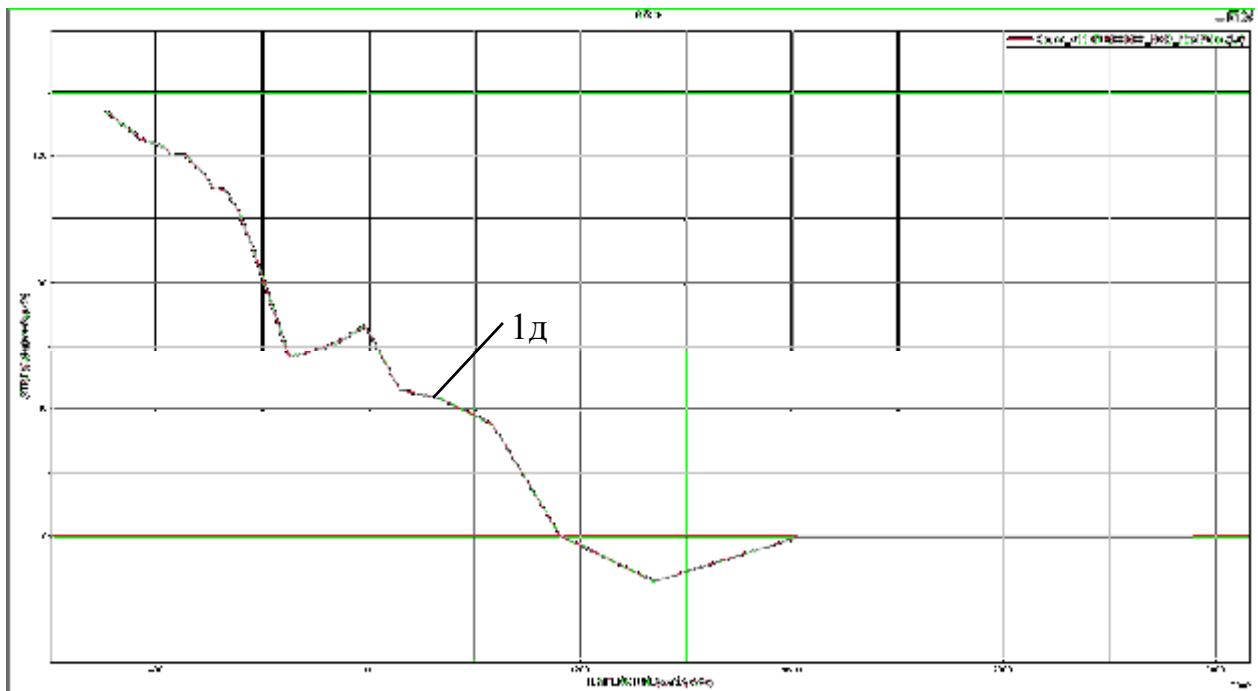


Рисунок 4.16 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования начало сварного шва

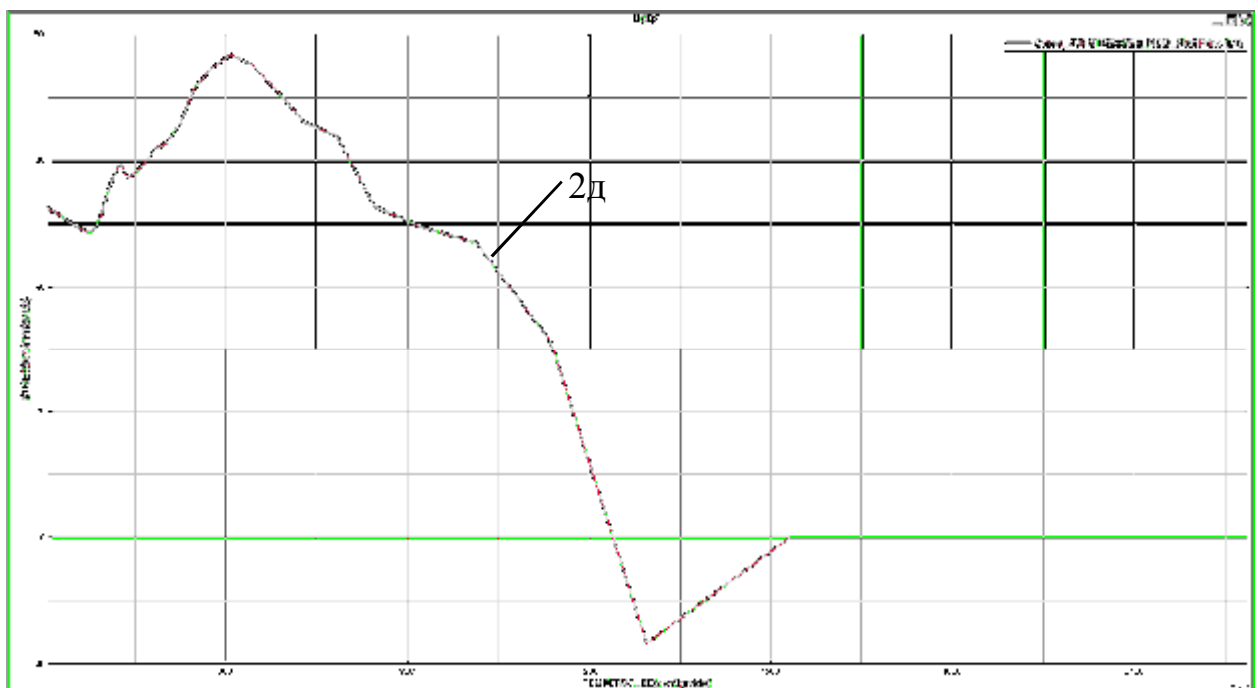


Рисунок 4.17 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования начало сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

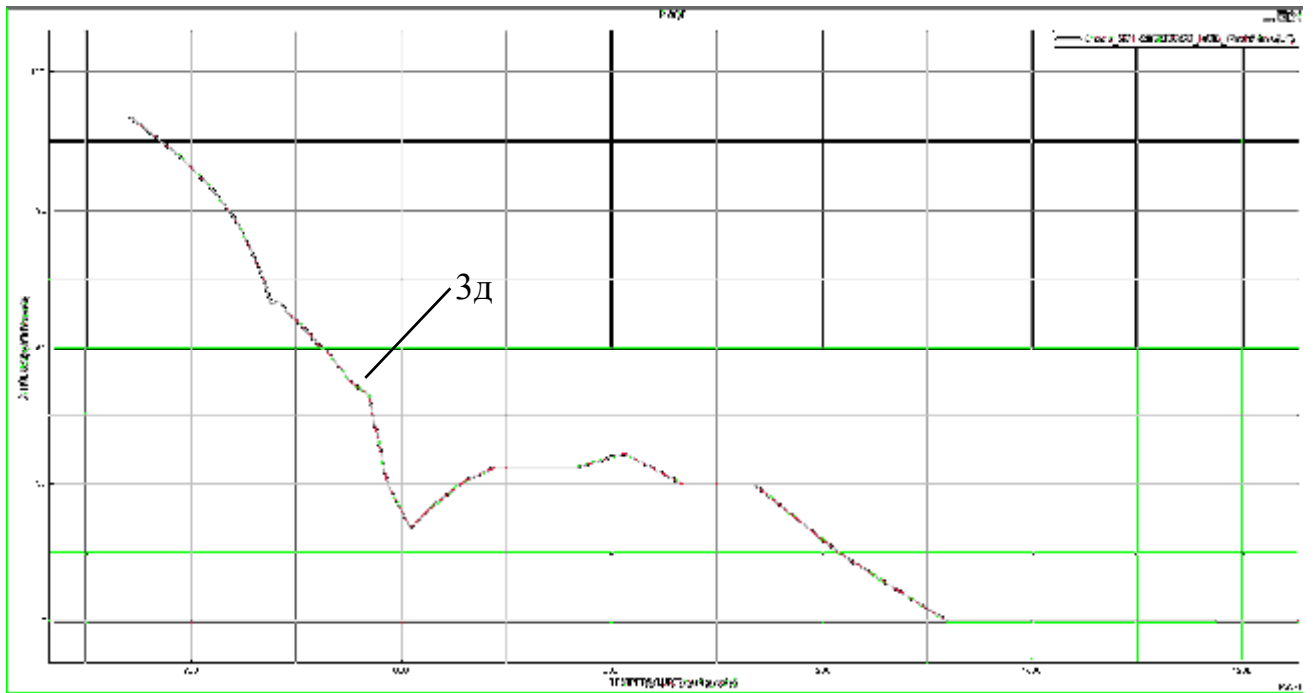


Рисунок 4.18 – Напряжения в корне сварного шва. Зона исследования начало сварного соединения

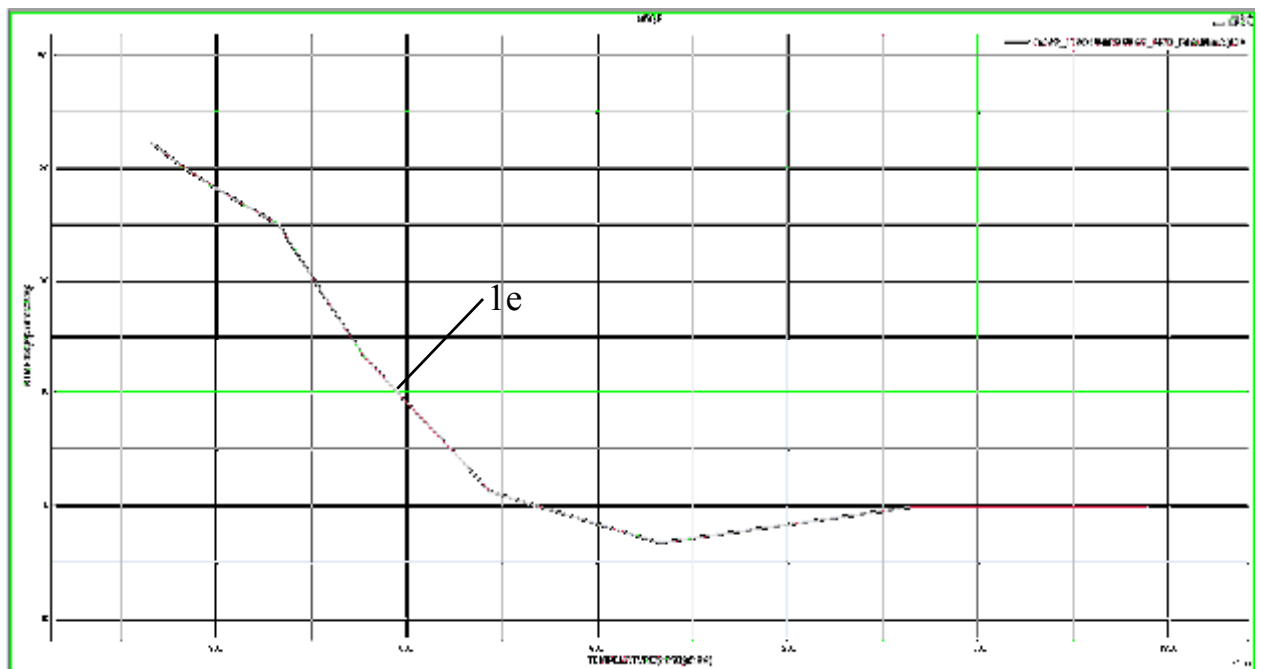


Рисунок 4.19 – Напряжения в центре сварного шва. Зона исследования конец сварного соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

Лист

41

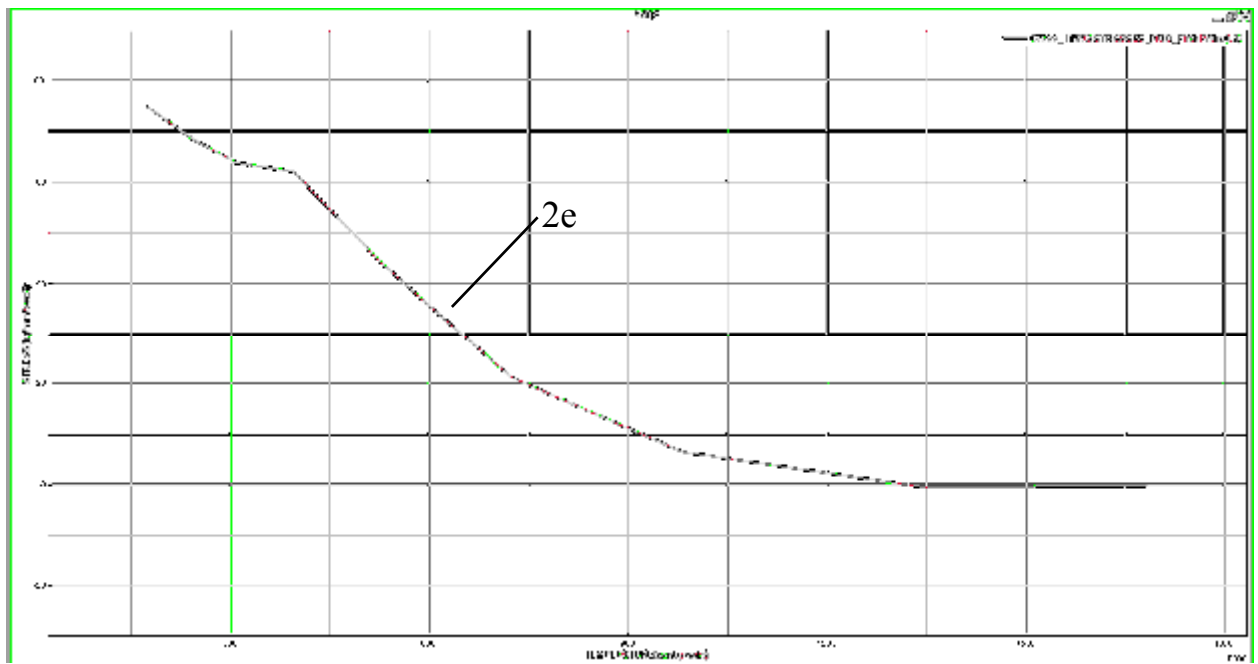


Рисунок 4.20 – Напряжения в зоне сплавления металлов. Зона исследования
конец сварного соединения

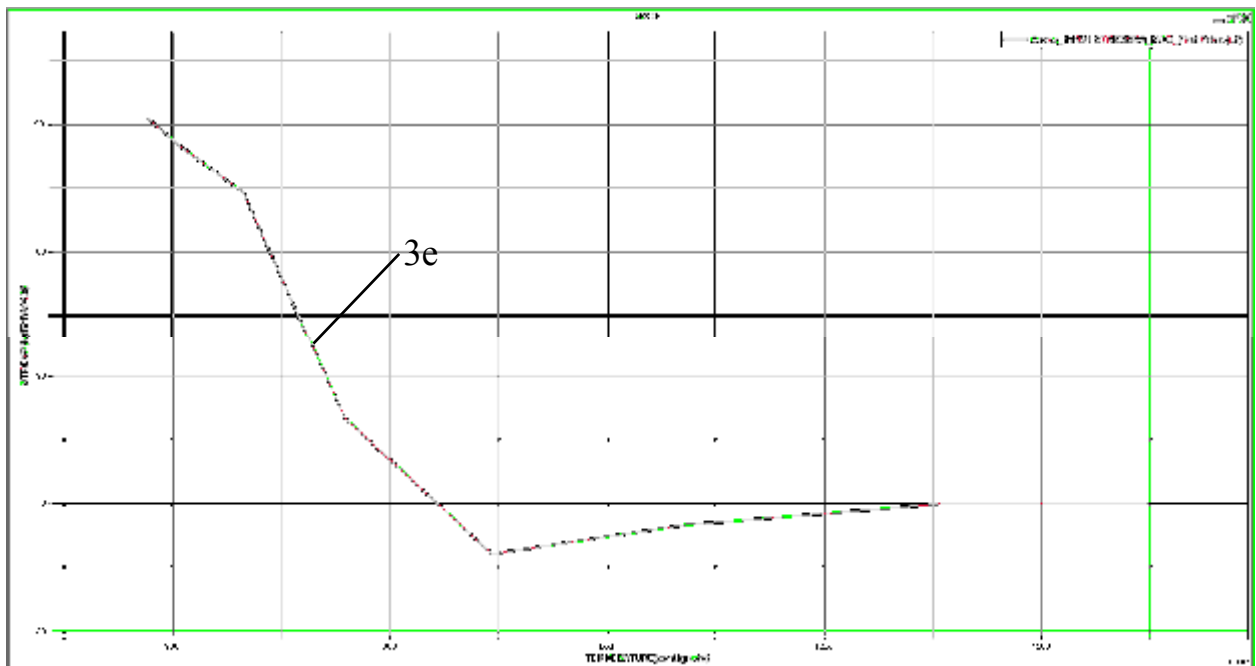


Рисунок 4.21 – Напряжения в корне шва. Зона исследования конец сварного
соединения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.243.00 ПЗ

4.3 График трещиностойчивости сварной конструкции

Трещиностойчивость сварного соединения должна быть больше единицы (11) во всем диапазоне температур. Это гарантирует отсутствие трещин при полном торможении усадки.

$$T_o^\sigma(t) > 1 \quad (11)$$

Для расчета трещиностойчивости необходимо знать данные напряжений возникающих в конструкции при охлаждении. В расчете будем использовать две точки 1а и 2а сварочной пробы «Теккен». Напряжения $\sigma(t)$ возникающие в конструкции берем с рисунков 4.2 и 4.3 (используем только растягивающие напряжения). Данные заносим в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Уровень напряжений в различных частях сварного шва

T, °C	1300	1000	872	630	400	200	20
$\sigma(t)$ для а1	–	–	89	444	575	309	350
$\sigma(t)$ для а2	–	–	75	136	186	233	250

Рассчитаем трещиностойчивость стальной конструкции по выражению (10). Данные $\sigma(t)$ берем из таблицы 2.4. Результаты сведены в табл.4.2.

На рис. 4.22 представлены результаты расчета трещиностойчивости сварной конструкции

Таблица 4.2 – Трещиностойчивость сварной конструкции $T_o^\sigma(t)$

Марка стали	№ точки	Трещиностойчивость (ед.) при температуре, °C						
		T, °C	1300	1000	872	630	400	200
20	1а	–	–	0,88	0,46	0,81	1,67	1,48
	2а	–	–	1,05	1,51	2,53	2,17	2,08

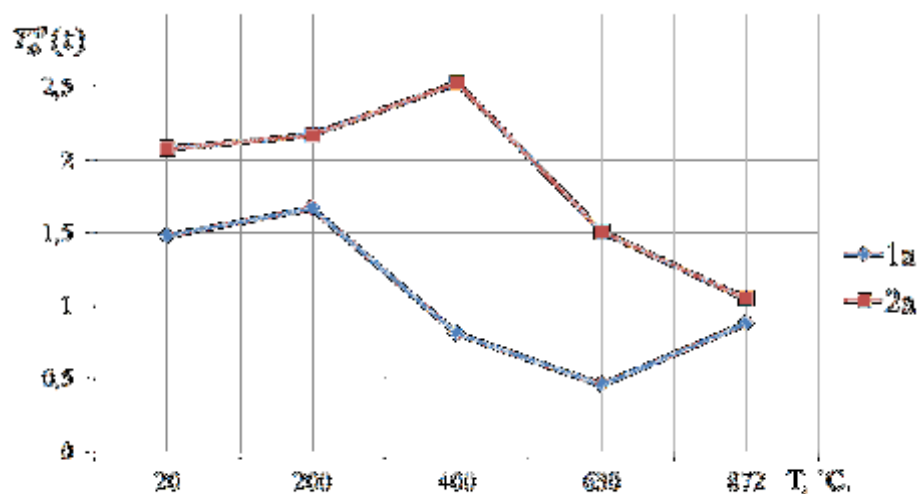


Рисунок 4.22 – Трещиностойчивость сварной конструкции

Из рис. 4.22 следует, что запас технологической прочности, то есть трещиностойчивость в точке 1а (зона сплавления металлов) не соответствует выражению (11). Значит, в этой области возникновение трещин прогнозируется с большей вероятностью.

В точке 2а (центр сварного шва) по всему интервалу охлаждения трещиностойчивость соответствует выражению (11). Следовательно, в этой области маловероятно образование трещин.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью моделирования сварочного процесса пробы «Теккен» в программе ESI SYSWELD мы определили опасные сечения, где возникают наибольшие напряжения. Мы обнаружили, что наибольшие напряжения возникают в корне сварного шва при старте и окончании сварки. Построили график трещиностойчивости сварного шва в различных точках этих сечений. В центральной части, наибольшие напряжения возникают в зоне сплавления металлов. И они в 2 раза меньше чем на краях.

Нами разработанная проба «ОиТСП 01», с позиции жесткого закрепления материала. Полученные результаты моделирования показали, что проба «Теккен» является более жесткой и опасной для образования трещин.

Разработанная методика оценки трещиностойчивости сварного шва при его охлаждении позволяет оценить любую технологическую пробу на трещиностойчивость, продолжит поиски универсальной пробы, которая захватывала бы высокотемпературную область.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нехендзи, Ю.А. Стальное литье. Учебник / Ю.А. Нехендзи. – М.: Metallurgizdat, 1948. – 766 с.
2. Бочвар, А.А. Металловедение. Учебник для вузов. / А.А. Бочвар, 5-е издание. – М.: Metallurgizdарт, 1956. – 724 с.
3. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке / Н.Н. Прохоров. – М.: Metallurgizdat, 1976. – Т. 2. – 599 с.
4. Новиков, И.И. Горячеломкость металлов и сплавов. / И.И. Новиков. – М.: Наука, 1966. – 300 с.
5. Баландин, Г.Ф. Основы теории формирования отливки. / Г.Ф. Баландин. – Ч. II. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
6. Швецов В.И. Производство отливок из стали. Учебное пособие. / В.И. Швецов, В.М. Александров. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – 86 с.
7. К вопросу о горячих (кристаллизационных) трещин при литье и сварке. / А.А.Бочвар, Н.Н. Рыкалин, Н.Н. Прохоров, И.И. Новиков, Б.А. Мовчан. // Литейное производство, 1960. – № 10. – С. 47.
8. Бидуля, П.Н. Образование и предупреждение горячих трещин. – Горячие трещины в сварных соединениях, слитках и отливках. / П.Н. Бидуля, В.Т. Грузин, В.Н. Совеико. // А.Н. СССР, 1959. – С. 39-50.
9. Шатов, А.Я. Повышение сопротивляемости отливок образованию горячих трещин. / А.Я. Шатов, В.Н. Яковлев, Я.В. Копылов // Литейное производство, 1980. – № 8. – С. 18-19.
10. Развитие теории трещиностойчивости отливок / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Е.А. Волосатова, Д.В. Изотов. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – Вып. 17. – 2011. – № 36. – С. 48-50.
11. Швецов, В.И. Особенности производства стальных отливок. / В.И. Швецов, Б.А. Кулаков, М.А. Иванов. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2014. – С. 105-176.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

12. Рабинович, Б.В. Введение в литейную гидравлику. / Б.В. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1965. – 423 с.

13. Рыжиков, А.А. Теоретические основы литейного производства. / А.А. Рыжиков. – М.: Свердловск, МАШГИЗ, 1954. – 331 с.

14. Василевский, П.Ф. Технология стального литья. / П.Ф. Василевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.

					15.04.01.2017.243.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47