

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.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К  
МИНИМАЛЬНЫМ КАТЕТАМ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ (МАГИСТЕРСКОЙ  
ДИССЕРТАЦИИ)  
ЮУрГУ-15.04.01.2017.244.00. ПЗ ВКР**

Руководитель ВКР

Доцент кафедры ОиТСП ЮУрГУ  
Должность

\_\_\_\_\_ А.К. Тиньгаев  
Подпись И.О., Фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор ВКР

магистрант группы П-246

\_\_\_\_\_ Т.В. Каримов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролёр  
преподаватель

\_\_\_\_\_ Ю.В. Безганс

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Тавровые соединения в сварных металлоконструкциях занимают первое место по протяженности: в корпусе судна они составляют до 80...85 %, в строительных металлоконструкциях (балках, стойках, рамах, перекрытиях и т. п.) их доля еще больше. С точки зрения степени ответственности все эти соединения принято делить на рабочие и связующие. Первые предназначены для передачи нагрузки с одного элемента конструкции на другой (например, соединения в узлах пересечения или притыкания балок), вторые только объединяют эти элементы в единое целое (так называемые поясные швы) и практически не участвуют в передаче рабочих нагрузок. Естественно, что и требования к размерам этих швов различны.

Рабочие соединения должны назначаться из условий достаточной прочности, если нагрузка на них меньше, чем на основной металл, или равнопрочности, если они несут такую же нагрузку. Превышение катета сверх необходимого нежелательно, так как, не увеличивая несущей способности узла, оно существенно повышает затраты на сварку. Занижение катета, наоборот, уменьшает прочность узла, что недопустимо. Катеты связующих соединений должны назначаться минимальными, исходя из конструктивно-технологических соображений.

Отнесение сварного соединения к той или иной группе и определение степени ответственности (загруженности) того или иного соединения иногда устанавливаются нормами на проектирование, как это делается, например, в Правилах классификационных обществ в судостроении. Однако в связи с многообразием сварных металлоконструкций в других отраслях промышленности в большинстве случаев решать эту задачу приходится проектировщикам или технологам. Очень часто вследствие отсутствия опыта, а чаще нежелания брать на себя ответственность, последние идут по пути назначения как можно больших размеров катетов или необоснованного применения соединений со скосом кромок, обеспечивающим полное проплавление по толщине присоединяемого элемента. Естественно, это приводит к существенному увеличению расходов на сварку (расхода сварочных

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

материалов, электроэнергии, трудоемкости сварки и последующего устранения сварочных деформаций). Поэтому данная работа является актуальной.

Из всех эксплуатируемых угловых швов 65-70 % являются связующими сварными швами. Исследование определения минимального связующего сварного шва позволит снизить расход сварочных материалов, электроэнергии, трудоемкости сварки и последующего устранения сварочных деформаций. К примеру уменьшение катета сварного шва с 6 мм до 4 мм даёт экономию наплавленного металла до 50%.

Цель работы – разработка рекомендаций по назначению оптимальных размеров катетов связующих тавровых соединений при сварке низколегированных и низкоуглеродистых сталей.

основные задачи:

- провести анализ существующих норм по назначению минимальных катетов сварных швов;
- исследовать влияние катета сварного шва на фазовый состав и твердость сварного соединения;
- разработать рекомендации по назначению минимальных катетов сварных соединений стальных строительных конструкций.

## 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

### 1.1 Общие сведения, классификация, назначение угловых соединений

При производстве строительных стальных конструкций основной объем сварочных работ приходится на выполнение угловых швов. Эти швы в конструкциях заводского изготовления составляют по массе наплавленного металла более 90% , из них около 40% - расчетные швы, размеры которых устанавливаются при проектировании в соответствии с расчетами на прочность, и около 60% - конструктивные швы.

Угловое соединение - сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев (рис. 1.1.).

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

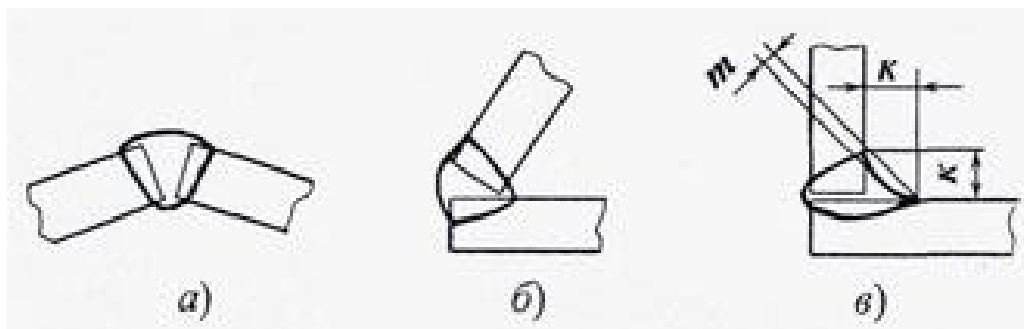


Рисунок 1.1 – Угловые соединения

Тавровое соединение - сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рис. 1.2).

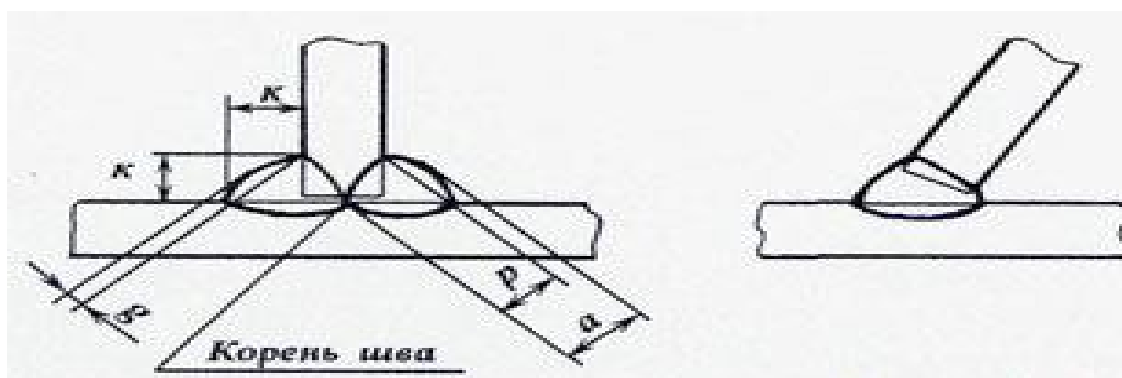


Рисунок 1.2 – Тавровые соединения

Нахлесточное соединение - сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 1.3, а, б). Отсутствие опасности прожогов при сварке облегчает применение высокопроизводительных режимов сварки. Применение нахлесточных соединений облегчает сборку и сварку швов, выполняемых при монтаже конструкций (монтажных швов).

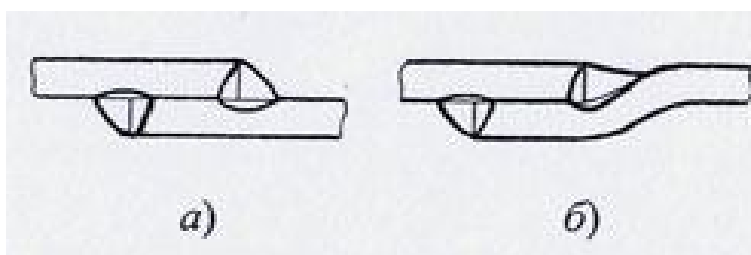


Рисунок 1.3 – Нахлесточные соединения (а, б)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Сварные швы подразделяют по разным признакам: по типу шва, по протяженности, по способу выполнения, по пространственному положению и по форме разделки кромок.

По типу сварные швы делят на стыковые, угловые и прорезные.

Угловой шов - сварной шов углового, нахлестанного или таврового соединений.

Угловой шов имеет следующие размерные характеристики: катет, толщину, расчетную высоту. Катет углового шва определяется кратчайшим расстоянием от поверхности одной из свариваемых частей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой части (см. рис. 1.2, в; 1.3, а). Катет задается в качестве параметра режима, который нужно выдерживать при сварке. Толщина углового шва «а» - наибольшее расстояние от поверхности углового шва до точки максимального проплавления основного металла (см. рис. 1.2). Для оценки прочности сварного соединения используют расчетную высоту углового шва -  $r$  (см. рис. 1.2). Для угловых швов более благоприятна вогнутая форма поверхности шва с плавным переходом к основному металлу.

Стыковые сварные швы, как правило, выполняют непрерывными. Угловые швы могут быть непрерывными (рис. 1.4, а) и прерывистыми (рис. 1.4, б), с шахматным (рис. 1.4, в) и цепным (рис. 1.4, г) расположением отрезков шва. Угловые швы могут быть выполнены и точечными швами (рис. 1.4, б, д).

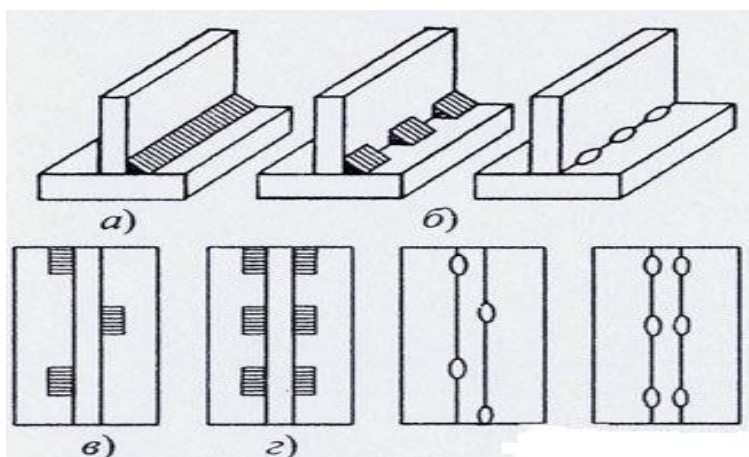


Рисунок 1.4 – Угловые швы тавровых соединений

## Назначение и область применения сварных швов

Швы различаются и по своей протяженности. Короткие не превышают по длине 250 мм, и делаются они на проход. От середины сопряжения двух металлических поверхностей и к краям свариваемой конструкции производятся средние швы, имеющие длину от 250 до 1000 мм. Длинные угловые швы превышают длину в 1000 мм.

По количеству слоев сварки угловые швы разделяются на однослойные и многослойные. Число слоев зависит от толщины элементов, которые подвергаются сварке. В частности, однослойная сварка используется в тех случаях, когда шовный катет (вертикальное или горизонтальное основание шва) составляет не более 8 мм в ширину.

1.2. особенности формирования сварных соединений с угловыми швами.  
(структура механические, погонная энергия)

Процесс сварки сопровождается существенными структурными и химическими изменениями, которые совместно с технологическими особенностями изготовления сварных соединений, приводят к появлению в них участков с различными механическими свойствами. Вследствие этого большинству сварных соединений присуща механическая неоднородность.

Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с угловыми швами.

В ряде случаев снижение долговечности конструкций связано с особенностями конструктивного оформления ее элементов в области сварного шва. Одной из распространенных причин разрушения сварных конструкций является образование и развитие трещин в зоне перехода от шва к основному металлу. Как правило, это обусловлено резким повышением напряжений за счет жесткости и концентрации напряжений в угловых точках сечения. Анализ напряженно-деформированного состояния вблизи линии сплавления сварного

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

шва, позволяет устанавливать обоснованные требования к геометрии шва при проектировании и изготовлении конструкций с угловыми швами.

В связи с тем, что оценку локального напряженного состояния металла вблизи дефектов сварного шва невозможно выполнить с приемлемой точностью, нет смысла на стадии проектирования конструкции моделировать локальное напряженное состояние металла в вершине технологических дефектов с целью расчета долговечности конструкции. Единственный путь предотвратить влияние технологических дефектов на долговечность состоит в том, чтобы ограничить размеры несовершенств сварного шва до приемлемых для практики размеров и ввести в расчет коэффициенты запаса прочности.

На стадии проектирования сварных соединений с угловыми швами необходимо уделить внимание моделированию локального напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу.

### 1.3 Свариваемость конструкционных сталей в соединениях с угловыми швами

В зависимости от химического состава сталь бывает углеродистая и легированная. Углеродистая сталь делится на низкоуглеродистую (содержание углерода до 0,25%), среднеуглеродистую (содержание углерода от 0,25 до 0,6%) и высокоуглеродистую (содержание углерода от 0,6 до 2,07%). Сталь, в составе которой кроме углерода имеются легирующие компоненты (хром, никель, вольфрам, ванадий и т.д.), называется легированной. Легированные стали бывают: низколегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, менее 2,5%); среднелегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, от 2,5 до 10%), высоколегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, более 10%).

По микроструктуре различают стали перлитного, мартенситного, аустенитного, ферритного и карбидного классов.

По способу производства сталь может быть:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.244.00 ПЗ

лист

11

а) обыкновенного качества (содержание углерода до 0,6%), кипящая, полуспокойная и спокойная. Кипящую сталь получают при неполном раскислении металла кремнием, она содержит до 0,05% кремния. Спокойная сталь имеет однородное плотное строение и содержит не менее 0,12% кремния. Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталями и содержит 0,05--0,12% кремния; серы и фосфора не должно превышать по 0,04% каждого элемента;

в) высококачественной- углеродистой или легированной, в которых содержание серы и фосфора не должно превышать соответственно 0,0025%. Такая сталь также имеет повышенную чистоту по неметаллическим включениям и обозначается буквой А, помещаемой после обозначения марки.

По назначению стали бывают строительные, машиностроительные (конструкционные), инструментальные и стали с особыми физическими свойствами.

Большинство сварных конструкций в настоящее время изготовляют из низкоуглеродистых сталей, содержащих углерода до 0,25 %. Низкоуглеродистые стали относятся к хорошо сваривающимся металлам практически всеми видами и способами сварки плавлением.

Технологию сварки для этих сталей выбирают из условий соблюдения комплекса требований, обеспечивающих, прежде всего равнопрочность сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном соединении. Сварное соединение должно быть стойким против перехода в хрупкое состояние, а деформация конструкции должна быть в пределах, не отражающихся на ее работоспособности. Металл шва при сварке низкоуглеродистой стали незначительно отличается по своему составу от основного металла -- снижается содержание углерода и повышается содержание марганца и кремния. Однако обеспечение равнопрочности при дуговой сварке не вызывает затруднений. Это достигается за счет увеличения скорости охлаждения и легирования марганцем и

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.244.00 ПЗ

Лист

12



кремнием через сварочные материалы. Влияние скорости охлаждения в значительной степени проявляется при сварке однослойных швов, а также в последних слоях многослойного шва. Механические свойства металла околошовной зоны подвергаются некоторым изменениям по сравнению со свойствами основного металла -- при всех видах дуговой сварки это незначительное упрочнение металла в зоне перегрева. При сварке стареющих (например, кипящих и полуспокойных) низкоуглеродистых сталей на участке рекристаллизации околошовной зоны возможно снижение ударной вязкости металла. Металл околошовной зоны охрупчивается более интенсивно при многослойной сварке по сравнению с однослойной. Сварные конструкции из низкоуглеродистой стали иногда подвергают термической обработке. Однако у конструкций с угловыми однослойными швами и многослойными, наложенными с перерывом, все виды термической обработки, кроме закалки, приводят к снижению прочности и повышению пластичности металла шва. Швы, выполненные всеми видами и способами сварки плавлением, имеют вполне удовлетворительную стойкость против образования кристаллизационных трещин из-за низкого содержания углерода. Однако при сварке стали с верхним пределом содержания углерода могут появиться кристаллизационные трещины, прежде всего в угловых швах, первом слое многослойных стыковых швов, односторонних швах с полным проваром кромок и первом слое стыкового шва, сваренного с обязательным зазором.

Несмотря на хорошую свариваемость низкоуглеродистых сталей иногда для предотвращения образования закалочных структур в околошовной зоне следует предусматривать специальные технологические меры. Поэтому при сварке первого слоя многослойного шва и угловых швов на толстом металле рекомендуется предварительный подогрев его до 120--150°С, чем обеспечивается стойкость металла против появления кристаллизационных трещин. Для уменьшения скорости охлаждения перед исправлением дефектных участков

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

необходимо выполнять местный подогрев до 150°C, что будет препятствовать понижению пластических свойств наплавленного металла.

Отличие среднеуглеродистых сталей от низкоуглеродистых в основном состоит в различном содержании углерода. Среднеуглеродистые стали содержат 0,26 -- 0,45 % углерода. Повышенное содержание углерода создает дополнительные трудности при сварке конструкций из этих сталей. К ним относится низкая стойкость против кристаллизационных трещин, возможность образования малопластичных закалочных структур и трещин в околошовной зоне и трудность обеспечения равнопрочности металла шва с основным металлом. Повышение стойкости металла шва против кристаллизационных трещин достигается снижением количества углерода в металле шва путем применения электродных стержней и присадочной проволоки с пониженным содержанием углерода, а также уменьшения доли основного металла в металле шва, что достигается сваркой с разделкой кромок на режимах, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла и максимальное значение коэффициента формы шва. Этому же способствуют электроды с большим коэффициентом наплавки. Для преодоления трудностей, возникающих при сварке изделий из среднеуглеродистых сталей, выполняют предварительный и сопутствующий подогрев, модифицирование металла шва и двухдуговую сварку в отдельные ванны. Ручную сварку среднеуглеродистых сталей ведут электродами с фтористо-кальциевым покрытием марок УОНИ-13/55 и УОНИ-13/45, которые обеспечивают достаточную прочность и высокую стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин. Если к сварному соединению предъявляются требования высокой пластичности, необходимо подвергнуть его последующей термообработке. При сварке следует избегать наложения широких валиков, сварку выполняют короткой дугой, небольшими валиками. Поперечные движения электрода нужно заменять продольными, кратеры заваривать или выводить на технологические пластины, так как в них могут образовываться трещины.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

#### 1.4 существующие нормативные требования

Основные виды сварки в цеховых условиях - автоматическая под слоем флюса и в защитных газах (как автоматическая, так и механизированная). На эти виды сварки в Японии приходится до 80% массы наплавленного металла. Однако в некоторых фирмах все еще применяется (до 65%) ручная дуговая сварка штучными электродами. В Японии в последние десятилетия сооружалось в среднем 2...3 км мостов в год, из них примерно 35...40% металлических массой 15000... 18000 тонн и около 50% железобетонных (преимущественно в монолитном исполнении).

В последние годы ручную сварку стала вытеснять механизированная сварка порошковыми проволоками диаметром около 2,0 мм в смеси защитных газов. Механизированная сварка порошковыми проволоками с газовой защитой применяется для стыковых соединений в вертикальном и потолочном положениях, а также для угловых швов внутри коробчатых элементов. В нижнем положении при значительной толщине металла находит применение многослойная сварка в узкую разделку порошковой проволокой. В цеховых условиях находят применение новые конструкции сварочных автоматов: портативные малогабаритные и комплексные многоэлектродные крупногабаритные и автоматизированные установки. На монтаже для сварки в нижнем положении очень широко применяется автоматическая сварка под флюсом и в незначительных объемах - механизированная сварка порошковыми проволоками малого диаметра без газовой защиты.

Имеются сведения, что одно время в США применялась электрошлаковая сварка для выполнения вертикальных монтажных соединений. Однако в последних публикациях такие сведения отсутствуют, очевидно по причине

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.244.00 ПЗ				

разрушения в ряде случаев таких соединений при эксплуатации мостов в условиях отрицательных температур.

В США для сварки как в цеховых, так и в монтажных условиях допустимо применение следующих способов: ручная дуговая сварка штучными электродами; автоматическая сварка под флюсом; электрошлаковая сварка; механизированная сварка проволокой сплошного сечения в защитных газах; то же порошковой проволокой в защитных газах; механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой; электрогазовая сварка сплошной проволокой в защитном газе вертикальных соединений с принудительным формированием. Производство сварочных работ на монтаже допустимо при температуре окружающего воздуха или металла не ниже - 18 °С. Температура металла контролируется вблизи сварного шва. Если температура основного металла ниже - 18 °С, то свариваемый металл должен подвергаться предварительному подогреву на расстоянии, равном толщине свариваемого металла, но не менее 76 мм во всех направлениях от места сварки. Для сталей марок A514, A517 и A852 максимальная температура предварительного подогрева должна быть 205 °С для толщины до 38 мм включительно и 230 °С для больших толщин.

Сварка относится к специальным технологическим процессам, которые в обязательном порядке регламентируются нормативными документами. В частности, в США производство сварочных работ в строительстве регламентируется нормативными документами, которые разрабатывает Американский Национальный Институт Стандартов (ANSI).

В соответствии с процедурами Американского Национального Института Стандартов (ANSI), AWS разработало около 230 стандартов (включая нормы и правила, спецификации изделия, рекомендованные инструкции, методы, и рекомендации) по процессам выполнения сварочных работ и сходным процессам. Основной стандарт AWS — *AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code — Steel* (Нормы и правила выполнения сварки строительных конструкций — Сталь) — ежегодно обновляется и является нормативным документом в области

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



$$k_{min} = 1.4 * \sqrt{\frac{14 + 22}{3}} = 4.9\text{мм}$$

Таблица 1.4– СП 16.13330 (российский стандарт)

СП 16.13330 (российский стандарт)									
Вид соединения	Вид сварки	Предел текучести стали, Н/мм <sup>2</sup>	Минимальный катет шва $k_f$ , мм, при толщине более толстого из свариваемых элементов $t$ , мм						
			4–5	6–10	11–16	17–22	23–32	33–40	41–80
Тавровое с двусторонними угловыми швами Нахлесточное и угловое	Ручная дуговая	До 285 Св. 285 до 390	4	4	4	5	5	6	6
		» 390 » 590	4	5	6	7	8	9	10
	Автоматическая и механизированная	До 285 Св. 285 до 390	5	6	7	8	9	10	12
		» 390 » 590	3	4	4	5	5	6	6
Тавровое с односторонними угловыми швами	Ручная дуговая	До 375	3	4	5	6	7	8	9
	Автоматическая и механизированная		4	5	6	7	8	9	10

### 1.5 методика назначения минимальных катетов связующих швов

Из различных тавровых соединений наиболее распространены соединения типа ТЗ (двусторонние, непрерывные, без скоса кромок), что объясняется их достаточно высокой прочностью в сочетании с высокой технологичностью и экономичностью по сравнению с другими. Основными параметрами соединения ТЗ, назначаемыми при проектировании, является катет шва  $k$  (в отечественной практике) или расчетная толщина  $a$  (в соответствии с Европейскими Нормами). Последняя однозначно связана с катетом и в большинстве случаев принимается  $a - 0,7k$ . Необходимая величина  $k$  или  $a$  для рабочих соединений должна определяться расчетом прочности, а для связующих - назначаться проектировщиком или технологом по рекомендациям норм и стандартов. И в том и в другом случаях последние устанавливают величины минимального и

максимального катетов (толщин шва). В отечественных стандартах эти величины приводятся в приложениях и имеют рекомендательный характер, а в Строительных Нормах, Правилах классификационных обществ, Европейских Нормах и в Американском стандарте они включены в основной текст документов и рассматриваются как обязательные. Сравнение требований указанных документов показывает, что в них много общего, но есть и различия.

Практически во всех Нормах основными параметрами, определяющими величину катета (расчетную толщину), являются минимальная из соединяемых толщин  $s_{min}$  для максимального катета и максимальная из соединяемых толщин  $s_{max}$  для минимального. Исключение составляют Правила классификационных обществ. Так, в Правилах Германского Ллойда при назначении минимального катета учитывают как максимальную  $s_{max}$ , так и минимальную  $s_{min}$  толщины соединяемых деталей и минимальный катет определяют по эмпирической

формуле  $k_{min} = 1.4 * \sqrt{\frac{s_{min} + s_{max}}{3}}$ , где все размеры в миллиметрах. В Правилах

Российского Морского Регистра величина минимального катета устанавливается в зависимости от минимальной толщины. Обычно это толщина притыкаемого элемента и составляет 4 мм для толщин от 4 до 10 мм, 5 мм для толщин от 11 до 15 мм и  $0,35s_{min}$  для больших толщин. При соединении деталей с большой разницей минимальной и максимальной толщин ( $> 2$  раза) назначение катета требует отдельного согласования с Регистром.

Максимальный катет ограничивается Нормами в зависимости от величины минимальной толщины  $s_{min}$  или  $1,2s_{min}$ , что определяется, очевидно, чисто экономическими соображениями. Действительно, несложные расчеты показывают, что уже при катете, равном толщине привариваемого элемента, площадь расчетного сечения соединения типа ТЗ длиной  $L$ , составляющая  $2 * 0.7kL$ , в 1,4 раза превышает площадь сечения основного металла  $sL$ . Поэтому при работе на срез такое соединение имеет избыточную прочность, а при отрыве оно практически равнопрочно основному металлу.

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.01.2017.244.00 ПЗ					

Учитывая это, Германский стандарт, принятый в качестве Европейских Норм, прямо указывает, что при  $k > 0,7s$  для сталей нормальной прочности и  $k > s$  для сталей повышенной прочности и приварке по всему периметру притыкания проверка прочности таврового соединения не требуется. Естественно, вопрос назначения катета, близкого к максимальному, целесообразно ставить только для рабочих соединений и решаться он должен, прежде всего, прочностным расчетом. Оптимальным можно считать только сварной узел с соединениями достаточной прочности. Поскольку площадь наплавленного металла пропорциональна квадрату катета, любое его необоснованное завышение приводит к значительному увеличению затрат на сварку и снижает экономические показатели конструкции. С учетом этого катеты связующих соединений, т. е. соединений, практически не передающих нагрузку, необходимо назначать по минимальным значениям, устанавливаемым или рекомендуемым нормативными документами.

Как отмечалось, основным критерием, определяющим величину минимального катета, в большинстве случаев является большая из толщин соединяемых деталей. Анализ таблицы показывает, что требования различных норм во многом совпадают, но есть и отличия. До толщины 20 мм включительно разница в величине минимального катета по всем нормам не превышает 1 мм.

Нормы обычно не поясняют, из каких соображений в качестве критерия для назначения минимального катета выбрана именно максимальная толщина. Только в Американском стандарте это мотивируется ограничением скорости охлаждения металла ЗТВ и содержания мартенсита в этой зоне. Очевидно, этот фактор можно считать обоснованным только в том случае, если сварка шва указанного катета выполняется за один проход, так как скорость охлаждения определяется погонной энергией одного прохода. Поэтому *назначение минимальных катетов* выше 8мм, которые завариваются обычно более чем за один проход нецелесообразно.

Очевидно, что отсутствие теоритических основ расчёта минимальных катетов сварных соединений может привести к ошибочным результатам при составлении нормативных требований на проектирование и изготовление сварных

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20



конструкций. В настоящее время проблема назначения минимальных катетов не достаточно изучена. Основным параметром определяющим минимальный катет сварного шва является толщина соединяемых элементов, при этом недостаточное внимание уделяется учёту влияния химического состава, параметров режима сварки и других факторов на технологическую прочность сварного соединения.

На основании анализа, выполненного в первой главе, обоснована цель настоящей работы и поставлены соответствующие задачи. Вторая глава посвящена разработке расчетных методов.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЁРДОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С МИНИМАЛЬНЫМИ КАТЕТАМИ

### 2.1 Объект исследования.

Объектом исследования является тавровое сварное соединение ТЗ по ГОСТ 14771-76\*, в котором торец одного элемента примыкает к поверхности другого элемента. Сварка выполняется плавящимся электродом в среде защитных газов.

В тавровом соединении неизменными размерами являются: ширина полки  $B=300\text{мм}$ ; высота стенки  $h=150\text{мм}$  и длина  $L=500\text{мм}$  (рис.2.1; 2.2)

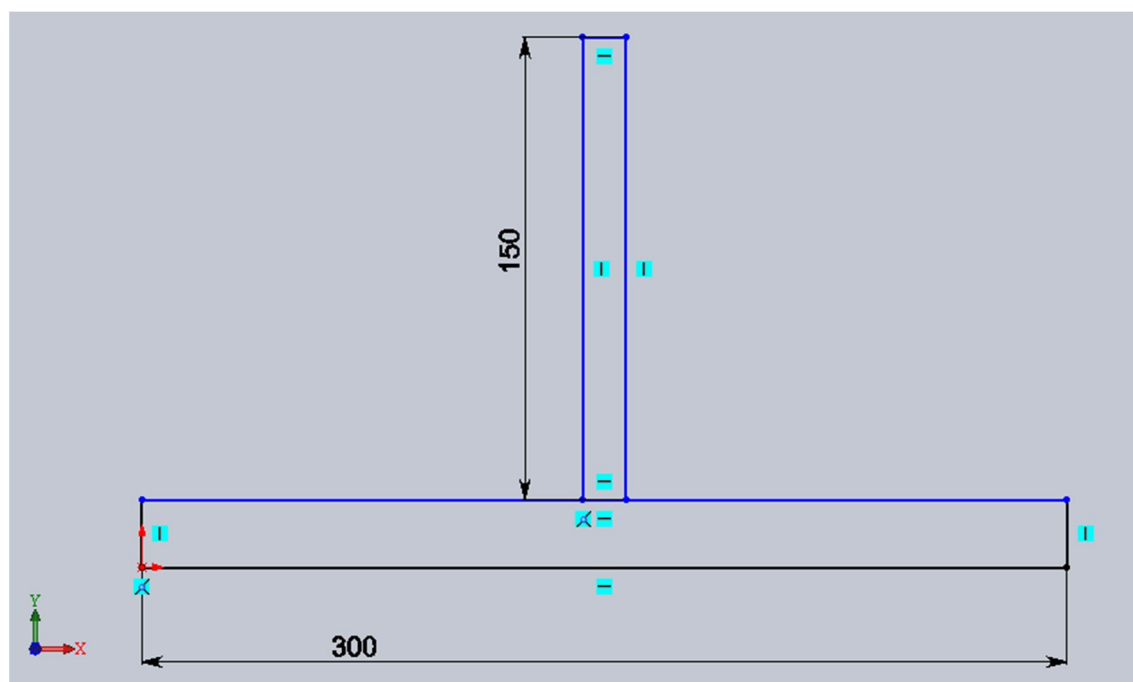


Рисунок 2.1 – Схема сварного таврового соединения без катетов

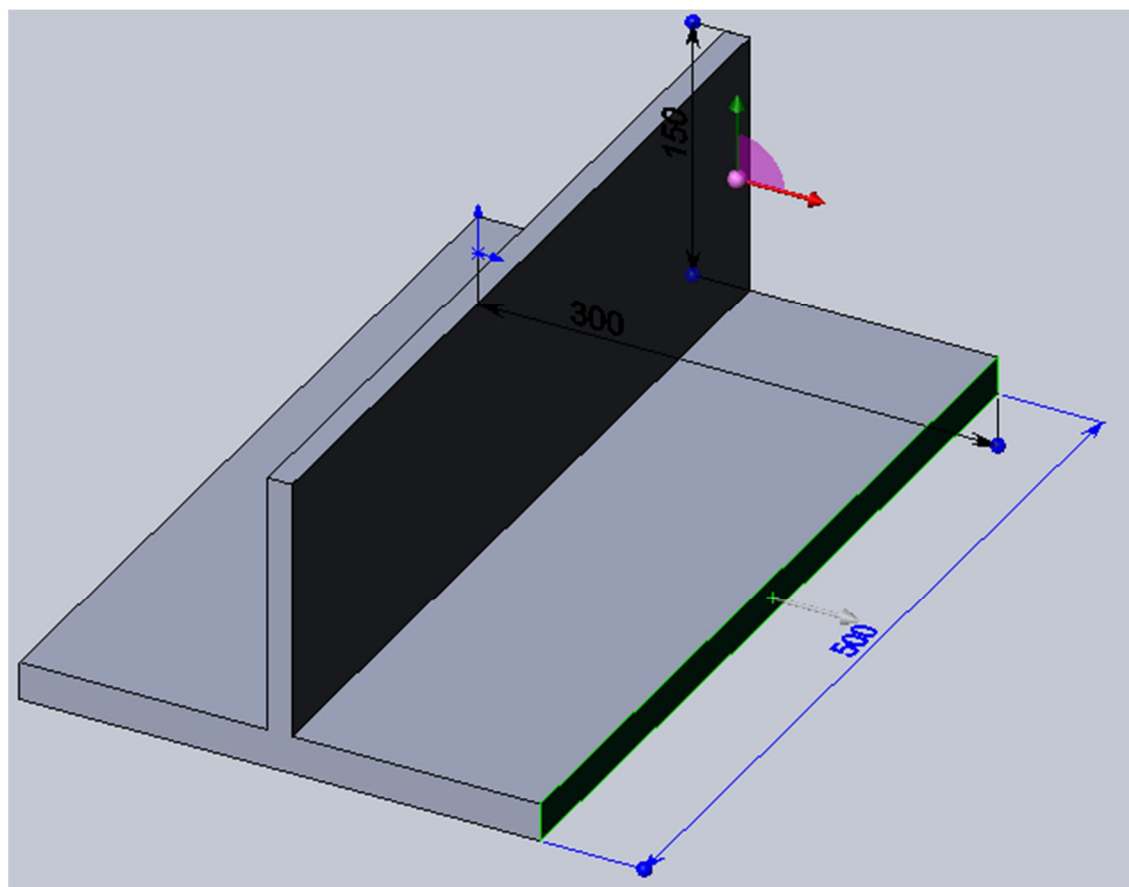


Рисунок 2.2 – Размеры контрольного сварного соединения ТЗ

В настоящее время, вследствие постоянного прогресса в области автоматизированных вычислительных средств, численных методов и программных алгоритмов, в результате приближения мощных коммерческих программных комплексов к нуждам рядовых пользователей, компьютерный инженерный анализ (computer aided engineering, CAE) становится важной и неотъемлемой частью технологических процессов производства. В данной работе мы рассмотрим типичный случай применения программного комплекса SYSWELD от ESI Group для исследования сварочных деформаций.

Качество и быстрота компьютерного расчета во многом определяются выбором программы. В нашем случае осознанно применялся SYSWELD, поскольку этот уникальный программный продукт специально предназначен для моделирования процессов сварки различных типов.

## - Программное обеспечение

Данный пример показывает, как с помощью решений от компании ESI Group можно оптимизировать технологию. В качестве решателя и препроцессора применялся комплекс Sysweld, в качестве постпроцессора — программа Visual Viewer.

Программа SYSWELD была разработана в 1970-х годах в недрах Министерства атомной промышленности Франции, а затем передана для коммерциализации французской фирме FRAMASOFT S.A., подразделению компании FRAMATOME, которая является известным разработчиком технологий, применяемых в атомной энергетике. Фирма FRAMASOFT S.A. сделала из SYSWELD мощный пакет программ виртуального моделирования сварки и термообработки для самых разных областей применения (рис. 2.3).

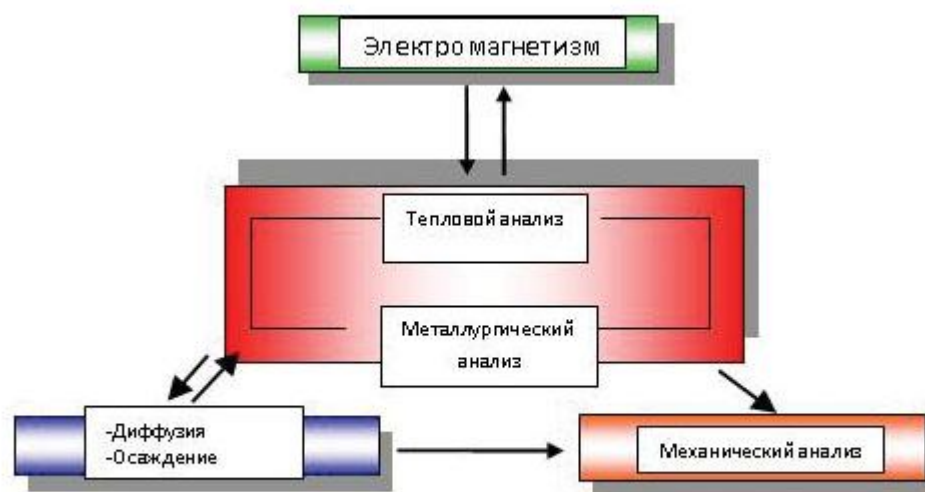


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема работы SYSWELD

SYSWELD — мощный комплекс программ, содержащий несколько модулей:

- Welding Wizard — моделирует все физические процессы, происходящие во время сварки;
- Heat treatment — моделирует все физические процессы, происходящие во время термообработки;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.244.00 ПЗ

Лист

23



- сварка трением;
- объемная закалка, объемное упрочнение;
- закалка с последующим отпуском и приобретение вторичной твердости;
- повышение поверхностной твердости;
- упрочнение поверхности, цементизация, азотирование;
- обработка с помощью бора, хрома, закалка на аустенит.
- 
- **Основные получаемые результаты:**

- температурное поле и градиенты температур;
- распределение фаз;
- твердость;
- деформации;
- остаточные напряжения;
- пластические деформации;
- предел текучести в зависимости от соотношения металлургических фаз
- расчёт параметров режимов сварки
- результаты исследования.

Внедрение математического моделирования процессов сварки с помощью SYSWELD позволит значительно сократить затраты на опытное производство, повысить качество выпускаемой продукции, решать сложные технологические задачи, на преодоление которых, как правило, уходит много времени. Численное моделирование процессов сварки поможет сделать продукцию намного более технологичной, поскольку все варианты технологии можно оценить предварительно, до воплощения конструкции в металле. Качественная отработка технологии с помощью SYSWELD обеспечит изделию длительную безаварийную эксплуатацию, что, безусловно, повышает репутацию производителя.

Все это наряду с повышением производительности труда дает производителю неоспоримые конкурентные преимущества, что очень важно в условиях современного рынка.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.244.00 ПЗ

Лист

25

Работа выполняется на программе Sysweld. Будут исследованы тавровые соединения ТЗ из материалов:

1. W\_DP-W-600, аналог 10ХСНД;
2. W\_S355J2G3, аналог 17ГС
3. W\_DC04, аналог сталь 10.

В программу вносятся погонная энергия, скорость сварки и размеры сварочной ванны. На первом этапе исследуется допустимость установленных стандартов размеров минимальных катетов, на втором, расчёт новых допустимых размеров катета, по рассчитываемой программой Sysweld твёрдости и химическому составу.

Результаты снимаются с области неполной кристаллизации и других точек.

## 2.2 Метод конечных элементов в программном комплексе SYSWELD

Для начала объясним, что такое метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

МКЭ-наиболее распространен и наиболее авторитетен.

МКЭ используется при выполнении проверочного расчета, для проведения которого необходимо знать геометрию соединения и хотя бы приблизительные линейные размеры. С этой целью в качестве первого приближения для выполнения расчета можно использовать традиционные методы расчета, а в дальнейшем перейти к МКЭ. Такой подход позволяет существенно снизить время реализации комплексного расчета сварного соединения.

Применение на втором этапе для прочностного анализа метода конечных элементов позволяет повысить надежность ответственных соединений, снизить металлоемкость и повысить технологичность сварной конструкции.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

### 2.3. Создание расчетной модели

Построение детали в разделе Mesh.

в программе sysweld чертим контур двутавра с исследуемым катетом по которому будет строиться сетка используя функции: «flat planar» и «move» (рисунок.2.4 )

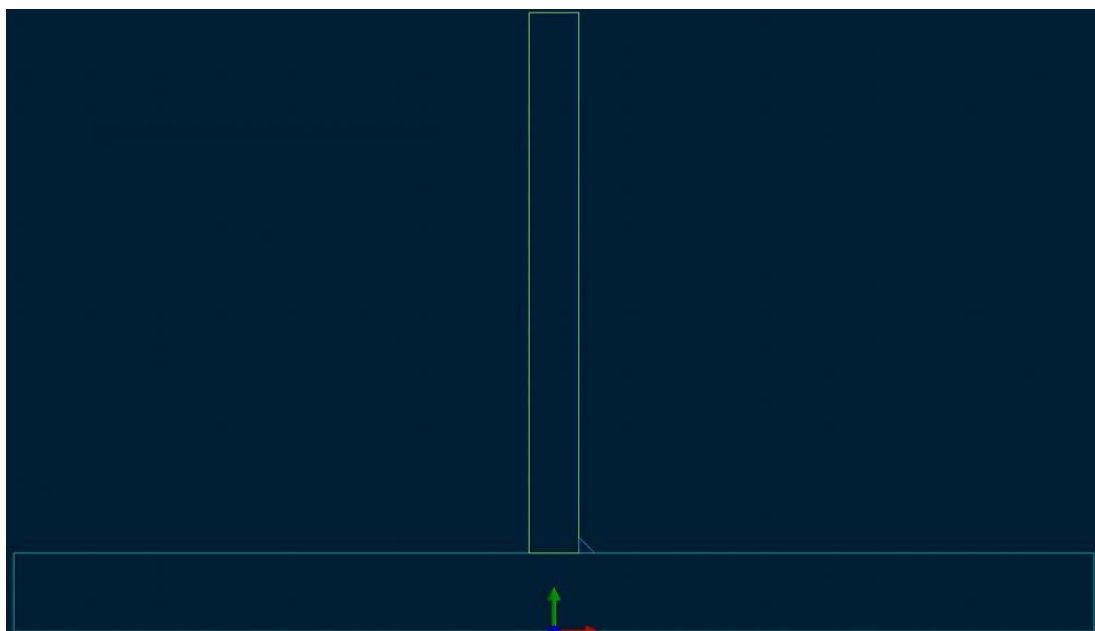


Рисунок 2.4 – контур ТЗ

Используя функцию «remesh» устанавливаем количество узлов сетки, её форму и расположение (рисунок.2.5).

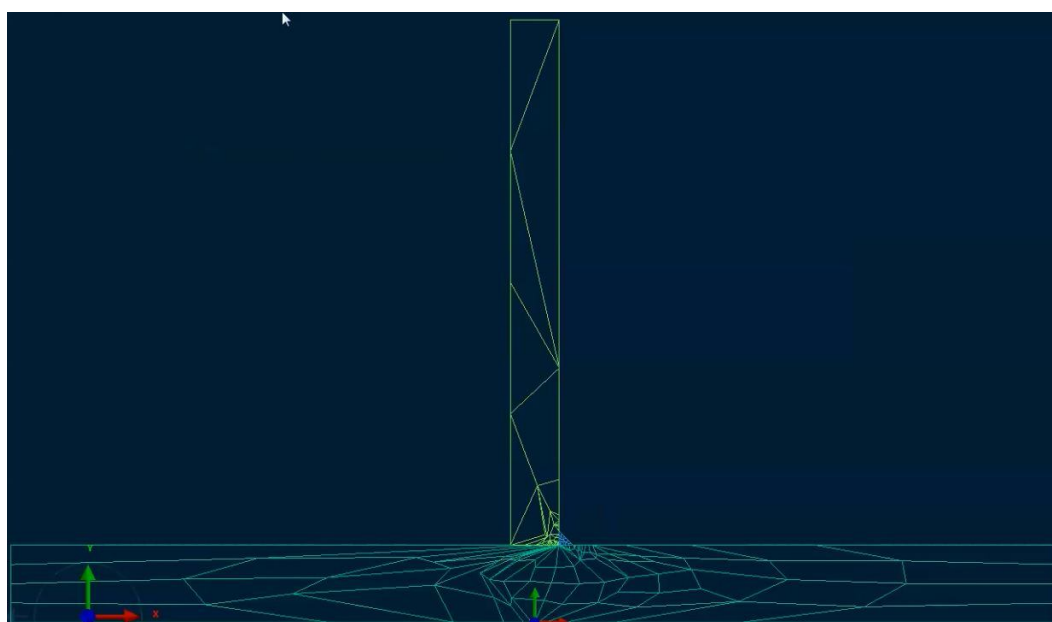


Рисунок 2.5 – Сетка распределения тепла

На следующем шаге вытягиваем контур в объёмную 3d модель используя

функцию «sweep drag». (рисунок.2.6)

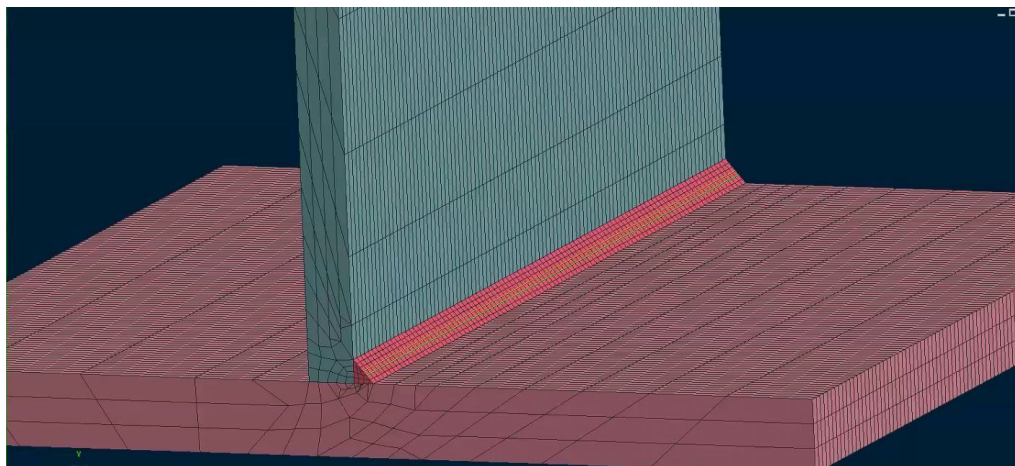



Рисунок 2.6 – 3d модель

Создаём коллекторы: polka, стенка, shov. И точку закрепления (в моём исследовании во всех расчётах закрепление жёсткое). Через функцию «extract from 3d mesh» выделяем все грани, кроме той где проходит сварной шов для создания поверхности охлаждения.

На данном этапе работа в разделе mesh закончена.

Переходим в модуль «weld».

В разделе weld создаем траекторию (линию сварки) и линию (направляющую), для задания угла наклона электрода накладывая точки по центру на поверхности сварного шва.

На этом этапе работа с деталью заканчивается. Переходим к заданию параметров режима сварки. Для этого на верхней панели открываем вкладку **Welding** и выбираем  **Welding Advisor**. В результате откроется окно пошагового задания параметров сварки и сварочной дуги (рисунок.2.7).

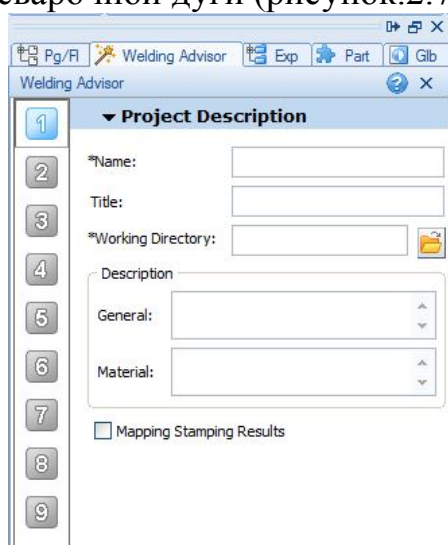


Рисунок 2.7 – Панель для ввода параметров режима сварки



- Характеристика свойств основного и присадочного материала

В качестве основного материала мы используем стали марок S355J2G3, W600, DC04, которые относятся к конструкционным сталям с пределом текучести не более 390 МПа ( $1 \text{ МПа} = \text{Н/мм}^2$ ) при температуре окружающей среды и работой разрушения при ударе 27 Дж, измеренной при температуре  $-20^\circ\text{C}$ .

Химический состав в % стали S355J2G3 (рисунок. 2.8)

Element	%Composition	Recommended Range(%)
Base	Fe	
Al		0 ~ 0.5
B		0 ~ 4
C	0.18	0 ~ 4
Co		0 ~ 10
Cr	0	0 ~ 27
Cu	0	0 ~ 7.5
Mg		0 ~ 0.5
Mn	1.6	0 ~ 4.5
Mo		0 ~ 10
N		0 ~ 0.5
Nb		0 ~ 4
Ni	0	0 ~ 36
P	0.035	0 ~ 0.05
S	0.035	0 ~ 0.05
Si	0.55	0 ~ 5.5
Sn		0 ~ 0.05
Ti		0 ~ 4
V		0 ~ 7
W		0 ~ 7
Zr		0 ~ 0.05

Рисунок 2.8 – Химический состав стал S355J2G3

Ее механические и термофизические свойства представлены графиками (рисунок. 2.9-2.12)

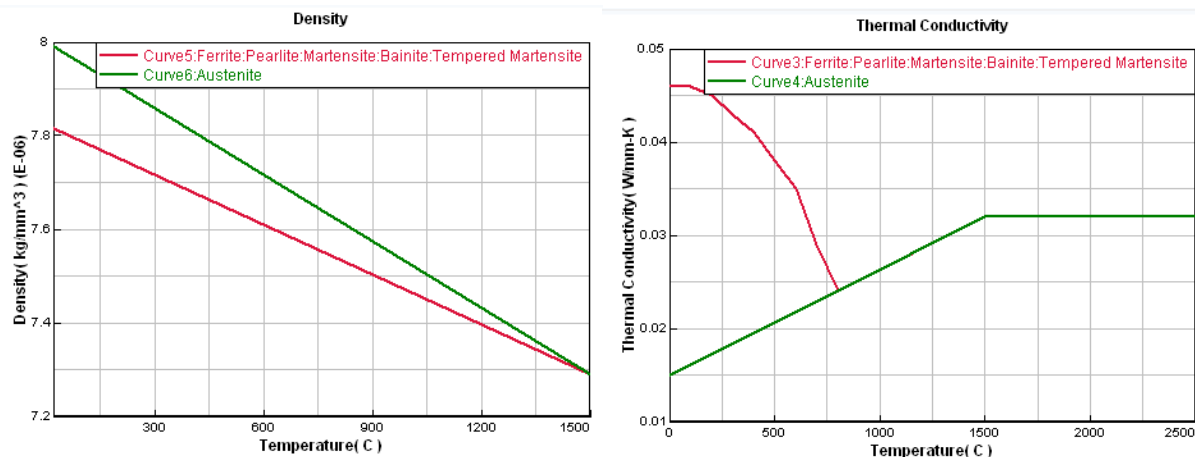


Рисунок 2.9 – Графики распределения плотности материала от температуры (слева) и теплопроводности материала от температуры (справа)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.01.2017.244.00 ПЗ

Лист

29

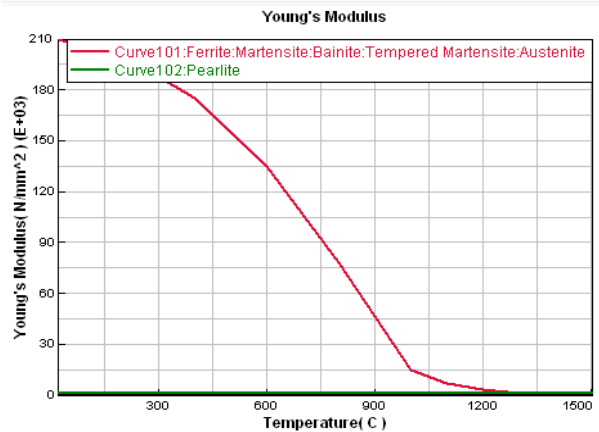
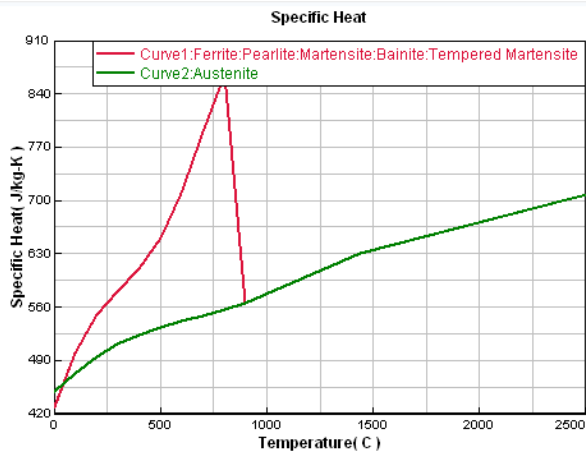


Рисунок 2.10 – Графики удельной теплоемкости материала от температуры(слева) и распределения модуля Юнга материала от температуры (справа)

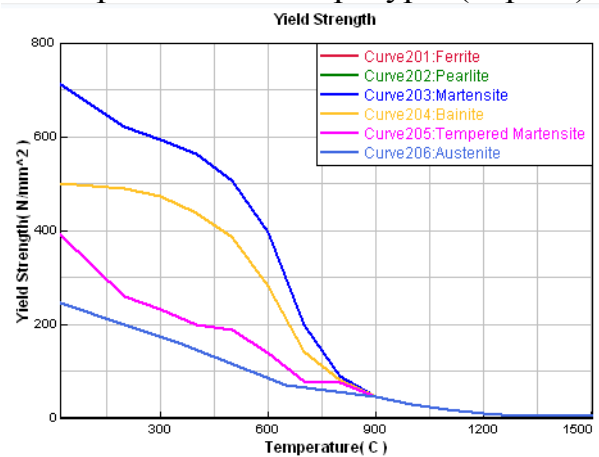
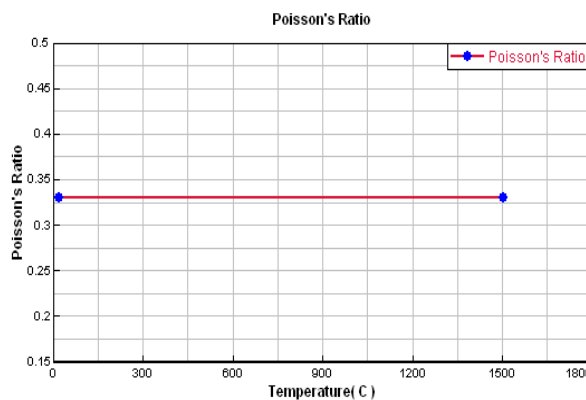


Рисунок 2.11 – Коэффициент Пуансона (слева) ; график распределения предела текучести материала от температуры( справа)

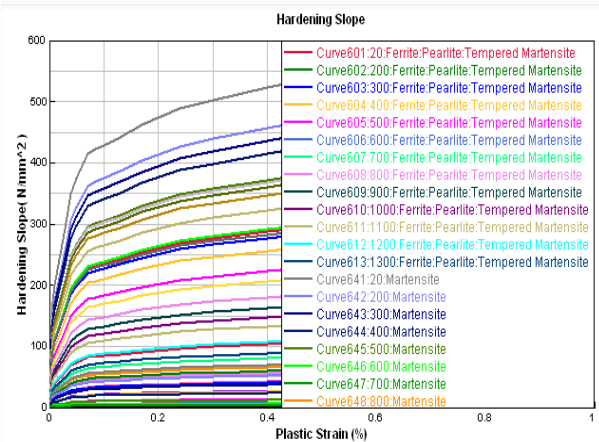
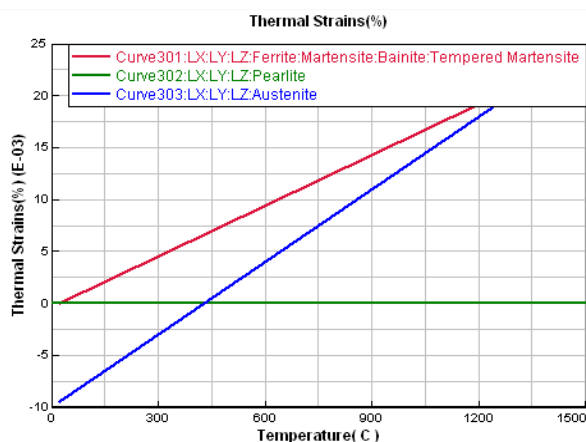


Рисунок 2.12 – Графики распределения термической деформации материала от температуры (слева) и распределения твердости материал (справа).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## Химический состав в % стали W600 (рисунок. 2.13)

Element	%Composition	Recommended Range(%)
<input checked="" type="checkbox"/> Base	Fe	
Al		0 ~ 0.5
B		0 ~ 4
C	0.085	0 ~ 4
Co		0 ~ 10
Cr	0.41	0 ~ 27
Cu	0	0 ~ 7.5
Mg		0 ~ 0.5
Mn	1.54	0 ~ 4.5
Mo		0 ~ 10
N		0 ~ 0.5
Nb		0 ~ 4
Ni	0	0 ~ 36
P	0	0 ~ 0.05
S	0	0 ~ 0.05
Si	0.11	0 ~ 5.5
Sn		0 ~ 0.05
Ti		0 ~ 4
V		0 ~ 7
W		0 ~ 7
Zr		0 ~ 0.05

Рисунок 2.13 – Химический состав стал W600

Ее механические и термофизические свойства представлены графиками (рисунок. 2.14-2.17).

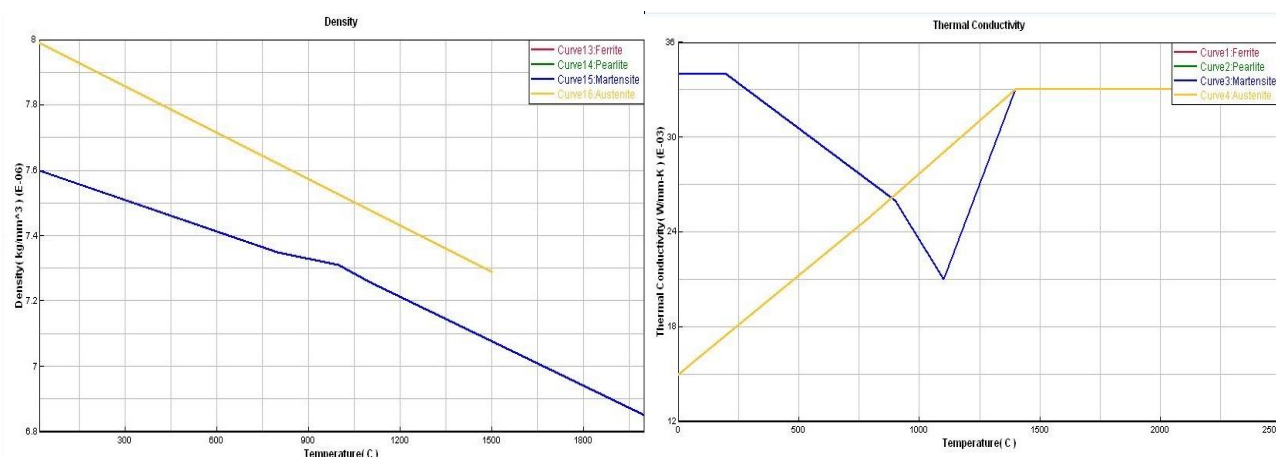


Рисунок 2.14 – Графики распределения плотности материала от температуры (слева) и теплопроводности материала от температуры(справа)

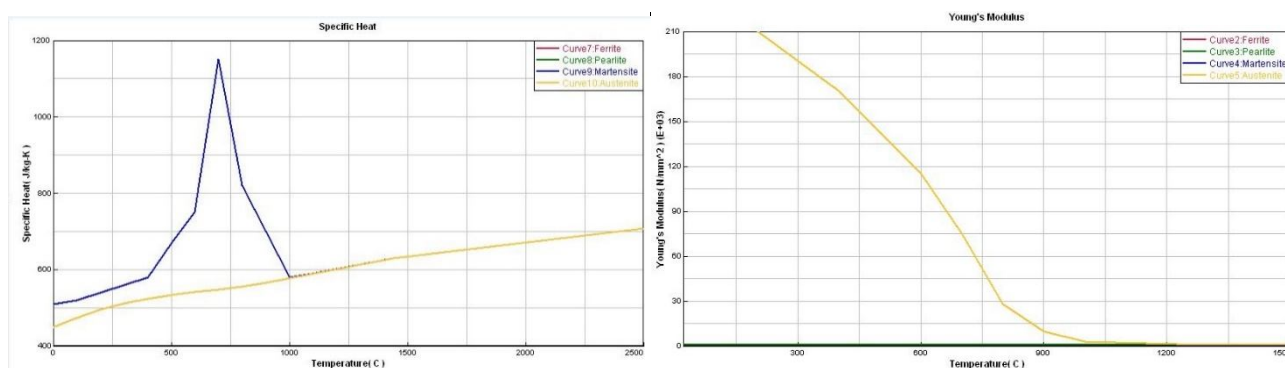


Рисунок 2.15 – Графики удельной теплоемкости материала от температуры(слева) и распределения модуля Юнга материала от температуры (справа)

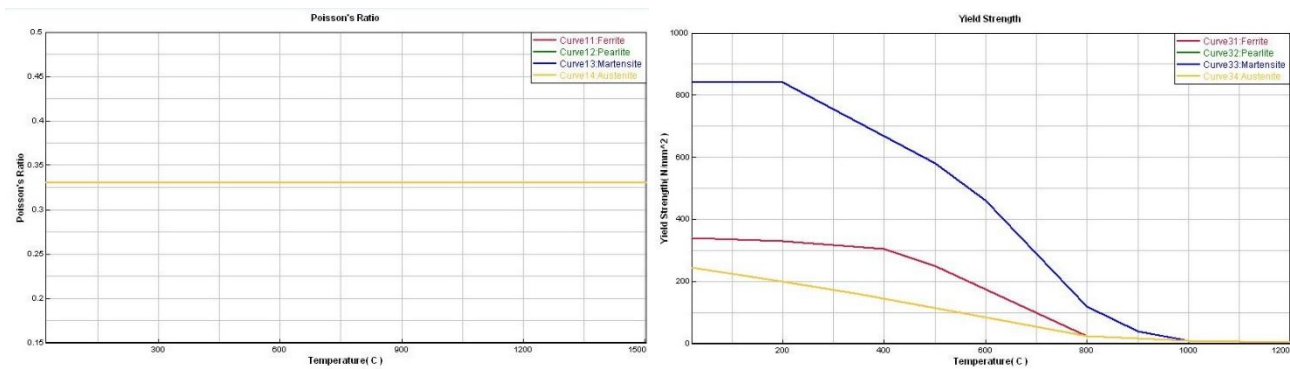


Рисунок 2.16 – Коэффициент Пуансона (слева); график распределения предела текучести материала от температуры (справа)

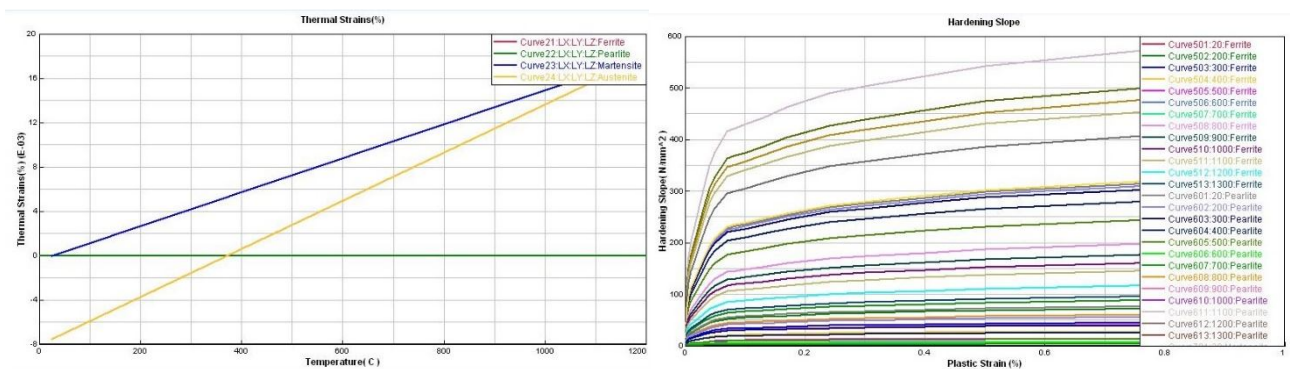


Рисунок 2.17 – Графики распределения термической деформации материала от температуры (слева) и распределения твердости материал (справа).

Химический состав в % стали DC04 (рисунок.2.18)

Element	%Composition	Recommended Range(%)
Base	Fe	
Al		0 ~ 0.5
B		0 ~ 4
C	0.08	0 ~ 4
Co		0 ~ 10
Cr	0	0 ~ 27
Cu	0	0 ~ 7.5
Mg		0 ~ 0.5
Mn	0.4	0 ~ 4.5
Mo		0 ~ 10
N		0 ~ 0.5
Nb		0 ~ 4
Ni	0	0 ~ 36
P	0.025	0 ~ 0.05
S	0.025	0 ~ 0.05
Si	0.07	0 ~ 5.5
Sn		0 ~ 0.05
Ti		0 ~ 4
V		0 ~ 7
W		0 ~ 7
Zr		0 ~ 0.05

Рисунок 2.18 – Химический состав стали DC04

## 2.4 Расчёт параметров режимов сварки

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

Для выполнения расчёта в программном комплексе sysweld необходимо подготовить и внести следующие данные:

- скорость сварки ( $V_{св}$ );
- величина сварочной ванны:
  - 1) Length (длина);
  - 2) Width (ширина);
  - 3) Penetration (глубина).
- погонная энергия ( $q_{п}$ ).

Параметры режима сварки соединения ТЗ стандартизированы в РД 34.15.132-96 и соответствуют следующим значениям:

$$I_{св} = 150 \text{ A};$$

$$U_{св} = 20 \text{ В};$$

$$d_{эл} = 1,2 \text{ мм}$$

Расчёт скорости сварки (2):

$$V_{св} = \frac{\alpha_H * I_{св}}{3600 * y * F_1} = \frac{10 * 150}{3600 * 7.85 * F_1} = \frac{0.053}{F_1}; \quad (2)$$

где

$$\alpha_H = \alpha_p * \left(1 - \frac{k}{100}\right) = 11 * 0.8672 = 10 \frac{\text{гА}}{\text{час}},$$

где  $k$ - коэффициент потери электродного металла;

$\alpha_H$ -коэффициент наплавки

$j$ - плотность тока

$$j = \frac{I}{d_{эл}} = \frac{150}{1.2} = 125 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2};$$

$$K = B * j * 10^{-2} - 4.48 * 10^{-4} * j^2 - 4.72 = 13.28;$$

$$F_1 = \frac{k^2}{2} = \frac{0.4^2}{2} = 0.08 \text{ см};$$

где  $k=4 \text{ мм}=0.4 \text{ см}$  – катет

$$V_{св} = \frac{0.053}{F_1} = \frac{0.053}{0.08} = 0.6625 \frac{\text{см}}{\text{с}};$$

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Рассчитываем погонную энергию (3) для скорости сварки  $V_{св}=0.6625$  см/с

$$q_{п} = \frac{I_{св} * U_{д} * n_{и}}{V_{св}} = \frac{150 * 20 * 0.85}{0.6625} = \frac{2550}{0.6625} = 3849 \frac{\text{Дж}}{\text{см}}; \quad (3)$$

Где  $n_{и}=0.85$  КПД источника питания

Размер сварочной ванны задаётся по таблице [6.1] Петров Г.Л., Тумарев А.С. «Теория сварочных процессов».

Необходимые для расчёта значения посчитаны и занесены в таблицу (Таблица.2.1– расчётные параметры)

Таблица 2.1– Расчётные параметры в зависимости от катета

К,мм	F <sub>1</sub>	V <sub>св</sub> , мм/с	q <sub>п</sub> , Дж/мм
2	2	26.5	97
3	4.5	11.77	217
4	8	6.625	385
5	12.5	4.24	602
6	18	2.94	868
7	24.5	2.16	1180
8	32	1.656	1540
10	50	1.06	2406

По приведённому выше алгоритму выполняем анализ для всех исследуемых катетов.

Результаты исследования.

На программе sysweld получены результаты фазового состава и твёрдости сварных швов с толщиной полок от 5 до 40 мм и катетами от 2 до 8 мм в разных комбинациях.

Составим таблицу группирующую все основные задействованные величины (Таблица 2.2– Совмещение параметров).

Таблица.2.2– Совмещение параметров

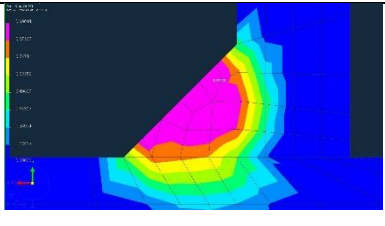
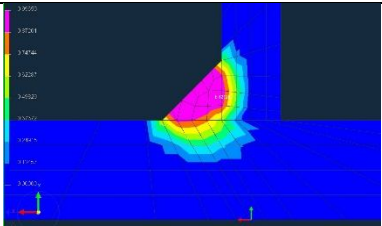
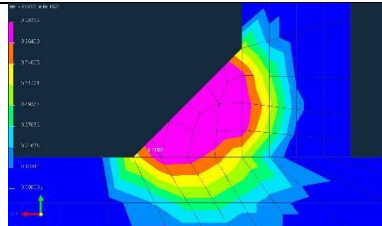
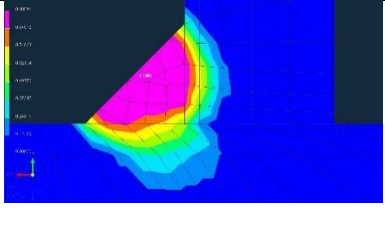
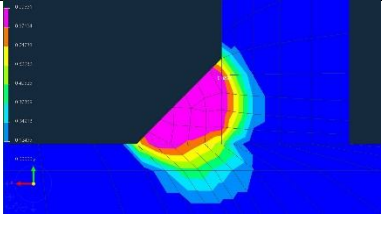
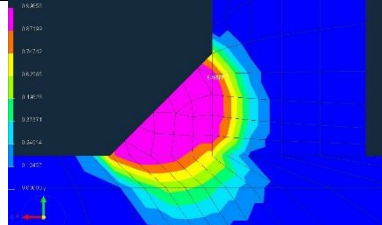
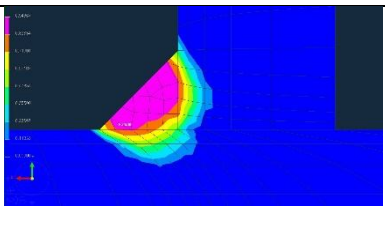
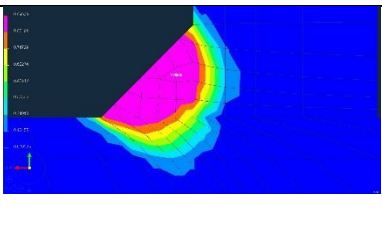
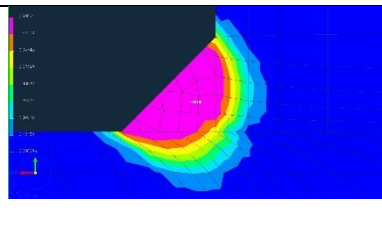
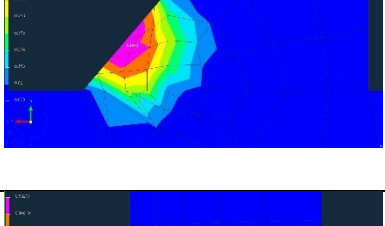
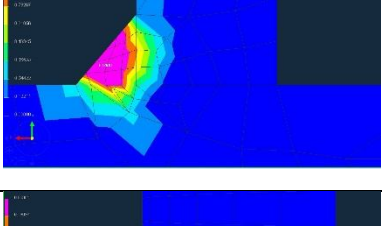
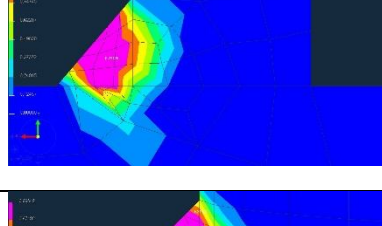

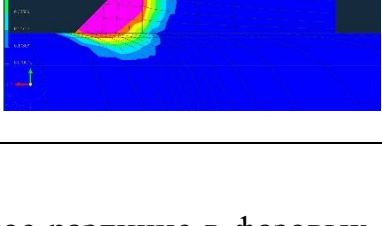
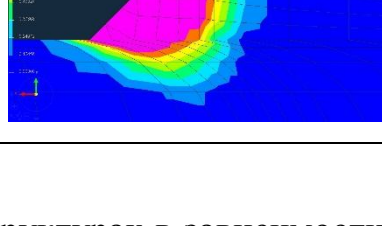
Толщина полки	4-5	6-10	11-16	17-22	23-32	33-40
$d_{эл}$ , мм	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
I, А	150	150	150	150	150	150
U, В	20	20	20	20	20	20
$V_{св}$ , см/с	1.177	0.6625	0.424	0.294	0.216	0.1656
Размеры стенки к полке	5:3	10:6	16:10	22:14	32:20	40:24
$K$ , мм От 285 до 390	3	4	5	6	7	8
$K$ , мм 390-590	4	5	6	7	8	9
$q_{п}$ , Дж/см	2166	3849	6014	8673	11805	15400
$F_1$ , мм	0.045	0.08	0.125	0.18	0.245	0.32

Приведём полученные расчётные данные по установленным стандартам минимального катета по СП 16.13330

Полученные результаты представлены на рисунках в таблице 2.3.



Таблица 2.3– Анализ существующих катетов

	DC04	S355_J2G3	W-600
5			
10			
16			
22			
32			

В таблице видно существенное различие в фазовых структурах в зависимости от металла, но соотношение размеров ЗТВ сохраняется по мере увеличения катетов, пропорционально режимам сварки.

Исходя из полученных данных делаем заключение, что установленные минимальные катеты отвечают нормативным требованиям.

Проводим расчёт в sysweld увеличивая и уменьшая катет снимаем данные фазового состава.



Таблица 2.4- исследования новых катетов по фазовому составу

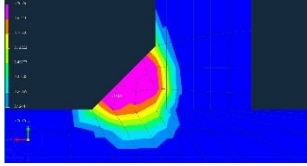
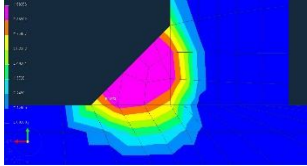
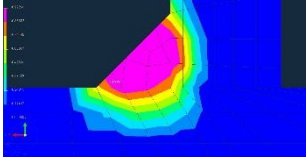
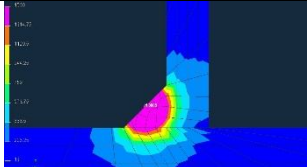
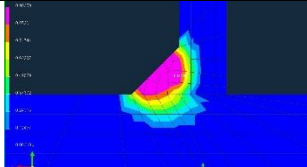
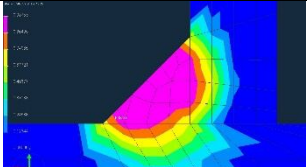
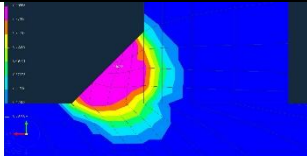
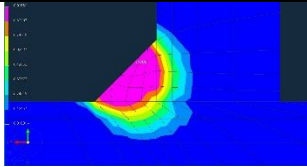
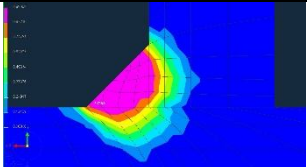
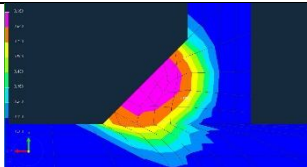
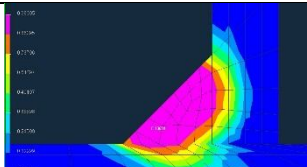
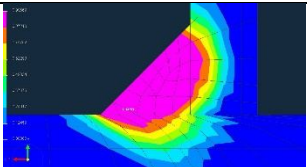
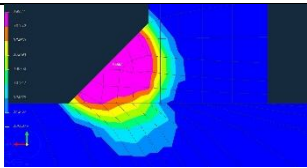
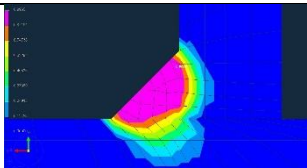
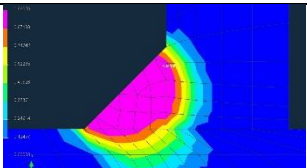
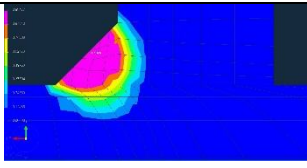
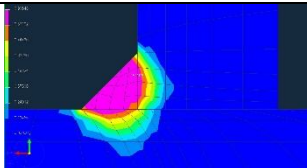
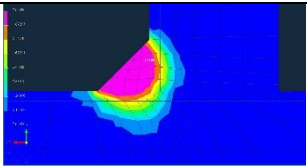
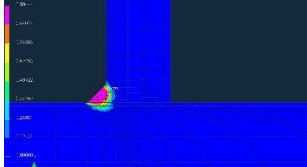
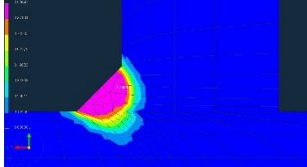
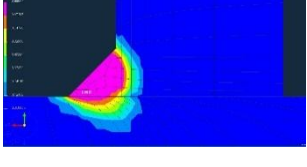
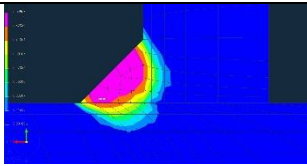
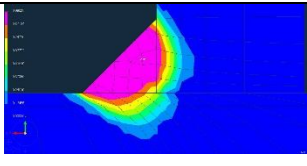
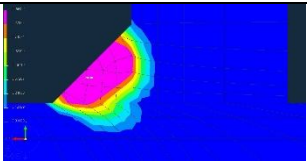
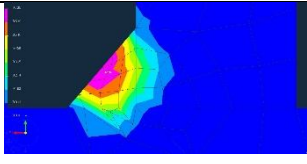
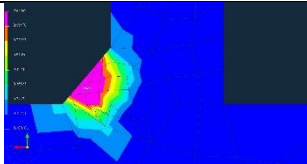
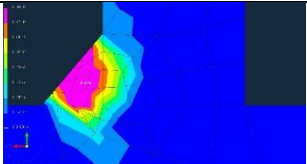
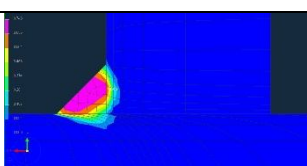
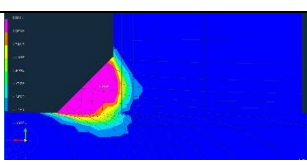
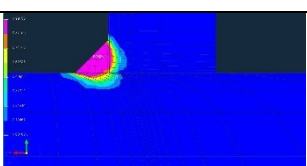
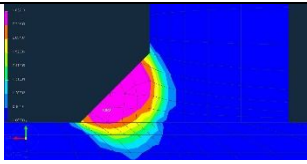
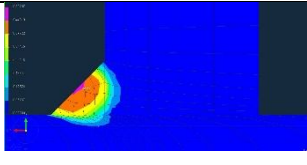
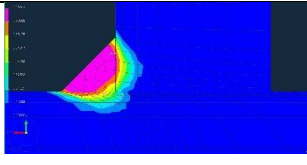
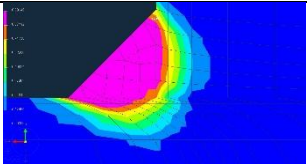
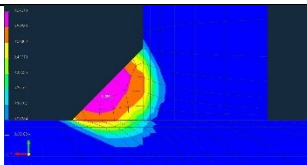
К	Толщина	материал		
		DC04	J2G3	W600
2	5			
3	5			
	10			
4	5			
	10			
	16			
	22			

Таблица 2.4- исследования новых катетов по фазовому составу

5	16			
6	22			
	32			
7	22			
	32			
8	22			

Снимаем данные твёрдости заносим в таблицу 2.5

Таблица 2.5– исследования новых катетов по твёрдости

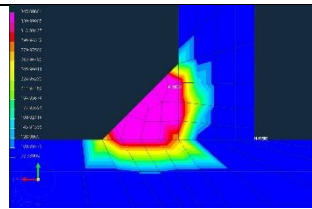
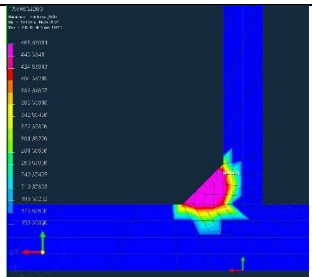
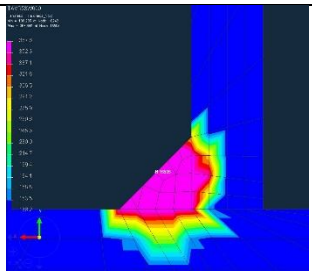
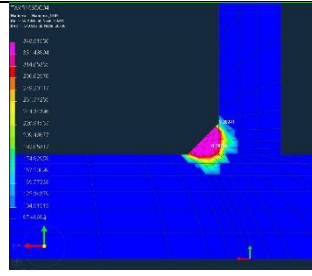
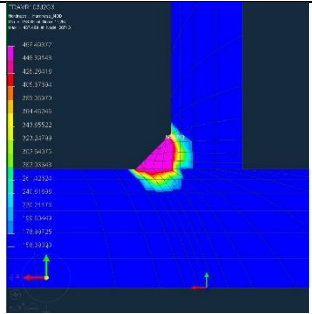
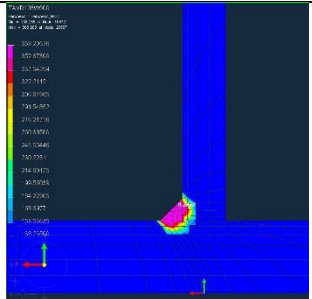
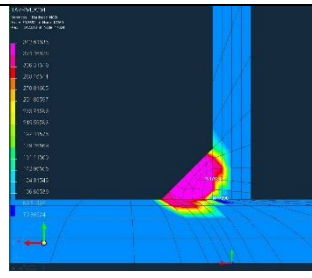
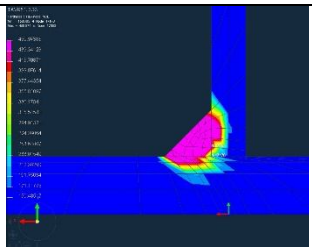
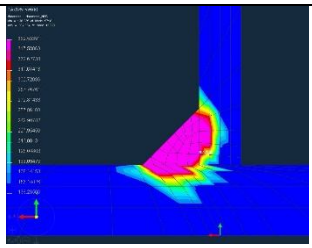

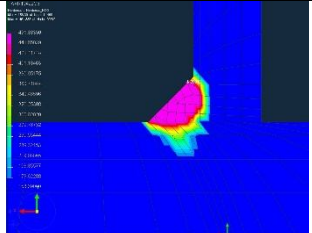

К	Толщина	материал		
		DC04	J2G3	W600
3	5			
	10			
4	5			
	10			

Таблица 2.5– исследования новых катетов по твёрдости

4	32			
5	16			
7	32			
8	22			

На основе полученных данных создаём новую таблицу допустимых минимальных катетов (таблица 2.6 – новые минимальные катеты.)

Таблица 2.6– новые минимальные катеты согласно расчёту в программе sysweld

Новые катеты	
Толщина полки (мм)	Катет шва (мм)
T<5	2
6-32	4

## Заключение

Из данных полученных в расчёте sysweld заметна закономерность фазового строения и твёрдости не зависящая от величины толщины полки.

В заключении по произведённым расчётам можно сделать вывод, что факторами влияющими на фазовый состав и твёрдость являются: химический состав, размер шва (так как чем больше шов тем медленнее его скорость охлаждения, но по расчёту в sysweld толщина полки не является решающим параметром, так как в интервале толщины полки от 10 до 32 катет имеет соприкосновение с большим объёмом теплопроводного материала в 1000 раз превышающего объём самого шва, и увеличение и без того огромного объёма металла тавра ТЗ путём утолщения полки со стенкой не даёт существенного увеличения скорости охлаждения), так же сильное влияние на структуру шва оказывают параметры сварки. Кроме того, предел текучести является не единственным параметром определяющим размер допустимого минимального катета, процентное содержание С так же оказывает существенное влияние на структуру сварного шва, чем больше количество углерода в свариваемой детали, тем выше образование твёрдой структуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Николаев, Г.А. Влияние дефектов сварки на механические свойства сварных соединений / Г.А. Николаев, С.В. Румянцев // Вопросы прочности металлов и конструкций: Темат. сб. научн. тр.-М: АН СССР, 1959.- С.82-91.

2. Шахматов, М.В. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с двухсторонней наружной трещиной в мягкой прослойке / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев// Темат. сб. научн. тр.: Вопросы сварочного производства.- Челябинск: ЧПИ.- 1983.-С.11-20.

3. Клыков, Н.А. Прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью / Н.А. Клыков, А.Л. Решетов // Автоматическая сварка. 1979. - №12. - С.29-32.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

4. Шахматов, М.В. Исследование влияния конструктивных и геометрических параметров стыковых биметаллических швов на работоспособность сварных соединений: автореф дис. канд.техн.наук / М.В.Шахматов. -М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1979. 16 с.

5. Бакши, О.А. Расчетная оценка прочности и энергоемкости сварных стыковых соединений при изгибе / О.А. Бакши, Б.Г. Кульневич // Автоматическая сварка.- 1965.-№7.-С.46-51.

6. Качанов, Л.М. Изгиб упругопластической прослойки / Л.М.Качанов // Тр. Ленинградского государственного университета: Исследования по упругости и пластичности.- 1964.-Вып.3.-С.52-61.

7. Иванова, Т.И. Влияние неоднородности сварных стыковых соединений на характер деформирования их при статическом изгибе / Т.И.Иванова // Сварочное производство.-1957.-№12.- С.17-21.

8. Бакши, О.А.Влияние степени механической неоднородности на вязкую прочность сварных соединений при растяжении / О.А. Бакши,

9. Т.В. Кульневич // Физика и химия обработки материалов. 1973. - №1. -С.23-27.

10. Гурьев, А.В. К вопросу о расчетной прочности сварных образцов с мягкой прослойкой при статическом растяжении / А.В. Гурьев, В.П. Багму-тов, Ю.Д. Хесин // Проблемы прочности. 1973. - №1. - С.9-13.

11. Харченко, Г.К. Прочность соединений с тонкой мягкой прослойкой / Г.К. Харченко, А.И. Игнатенко // Автоматическая сварка. — 1968.-№5. — С. 31-22.

12. Браженис, А.П. Исследование перераспределения деформаций в неоднородном сварном соединении при малоцикловом нагружении /

13. Шахматов, М.В. Оценка несущей- способности тавровых сварных соединений с непроварами в условиях вязкого разрушения при изгибе / М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Сварочное производство. — 2008.-№4.- С. 11-16.

14. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В.Соколовский // ГИТТЛ. -М.-Л.-1969.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

15. Когут, Н.С. Несущая способность сварных соединений / Н.С. Когут, М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев. Львов: Свит, 1991. - 184 с.

16. Бут, В.С. Повышение работоспособности нахлесточных сварных соединений / В.С. Бут, А.Е. Аснис, Г.А. Иващенко // Автоматическая сварка. — 1986.- №9. — С.35-37.

17. Механика разрушения и прочность материалов: Справ: пособие: В 4 т. Том 1 / под ред. В.В. Пкнасюка. Киев: Наукова думка. - 1988;

18. Ярославцев, С.И. Методика расчетной оценки прочности стыковых паяных соединений трубопроводов: автореф. дис. канд: техн. наук /

19. С.И. Ярославцев. Челябинск: ЧПИ, 1986. - 18 с.

20. Сварка и свариваемые материалы: Справочник в 3-х т. Том 1 / под . ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. - 528 с.

21. Котельников, А.А. Структура и свойства переходной зоны при диффузионной сварке стали 15 со сплавом АМц и алюминием АД2 через никелевую прослойку / А.А. Котельников, С.Е. Ушаков, В.И. Ильченко // Автоматическая сварка. 1970.-№11.-С.27-29.

22. Кусков, Ю.И. Прочность сваренных взрывом титаново-алюминиевых соединений и ее расчетная оценка / Ю.И. Кусков, В.С. Седых, Ю.П. Трыков // Сварочное производство.- 1975.-№9.-С.11-13.

23. Лаптев, А.А. Некоторые прочностные характеристики сварных соединений из высокопрочных нержавеющей сталей ВСН2 и ВСН5 / А.А. Лаптев, П.М. Любалин, И.Н. Белолетов // Сварочное производство.-1972.-№6.-С.29-31.

24. Бельчук, Г.А. О соотношениях показателей сопротивления деформации металла в сварных соединениях / Г.А. Бельчук // Тр. Ленинградского политехнического института. 1964 г. — Вып. 12. Сварочное производство. — С. 25-30.

25. Касаткин, Б.С. Применение низколегированных высокопрочных сталей для сварных конструкций / Б.С. Касаткин, В.Ф. Мусленченко. М.: Техника, 1972. - 37 с.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43



26. Окерблом, Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н.О. Окерблом. М.- JL: Машиностроение, 1964. -800 с.

27. Руссо, В.Л. Полуавтоматическая сварка стыковых соединений титановых сплавов больших толщин без разделки кромок / В.Л. Руссо, Б.В. Кудояров, А.А. Николаев // Сварочное производство. — 1971. №10. -С.20-21.

28. Лашко, С. В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. М.: Машиностроение, 1988. - 376 с.

29. Прохоров, Н.Н. Расчет процессов разупрочнения термически упрочненных сплавов вследствие коагуляции твердых частиц при сварке / Н.Н. Прохоров, Н.П. Шабалина, Ф.Ф. Волков// Сварочное производство. — 1975. -№9.-С.3-5.

30. Лебедев, Б.Д. Расчетное определение твердости зоны термического влияния / Б.Д. Лебедев, О.И. Дукельская, Е.А. Дашевская // Автоматическая сварка. 1975.-№3. - С.12-13.

31. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. -М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

32. Шрон, Р.З. Оценка прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности / Р.З.Шрон. Челябинск: Юж. Ур. Кн. изд-во,1963.- 22 с.

33. Ерофеев, В.П. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с щелевой разделкой кромок / В.П.Ерофеев, М.В.Шахматов // Автоматическая сварка. 1979.- №4 - С. 13-16.

34. Ерофеев, М.В. Оценка несущей способности цилиндрических толстостенных оболочек давления с кольцевой мягкой прослойкой / М.В. Ерофеев, В.В. Ерофеев, М.В. Шахматов // Известия вузов. Машиностроение. — 1993. -№1. С. 40-46.

35. Бельчук, Г.А. О приближенном расчете механических свойств свойств металла шва / Г.А. Бельчук // Сварочное производство. 1961. - №1. - С.18-22.

36. Шахматов, М.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. Челябинск: ООО «Абрис-Принт». - 2008. - 223 с.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44



37. Степанов, Г.А. Влияние дефектов сварки на работоспособность сварных соединений из алюминиевых сплавов. Обзорная информация / Г.А. Степанов, Р.Л. Ибатуллин, А.П. Калинина и др. М.: ЦИНТИ. — Химнефтемаш. -Сер. ХМ-9, 1980.-69 с.

					15.04.01.2017.244.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45