**ВВЕДЕНИЕ**

Фланцевые соединения являются ответственным элементом технологического оборудования в различных отраслях промышленности, от их способности сохранять прочность и герметичность в течение определенного периода времени зависит надежность и безопасность системы.

Эксплуатационные свойства фланцев во много определяются свойствами материала заготовки, которые зависят от способа изготовления. Наличие дефектов изготовления, неоднородность механических свойств, отклонения формы и шероховатости уплотнительных поверхностей в дальнейшем могут привести к разгерметизации и возникновению аварийной ситуации.

Фланцы должны обеспечивать герметичность и прочность собираемых конструкций. Роль качественного соединения немаловажна, ведь непрочное скрепление может приводить к большим потерям и грозить опасностью обслуживающему персоналу

На сегодняшний день насчитывается достаточное количество методик, по которым могут изготавливаться высококачественные фланцы. Это не препятствует постоянному совершенствованию и появлению методов, позволяющих значительно снизить производственные издержки.

Один из самых перспективных способов, сокращающих количество отходов – это использование отливок очень высокого качества, имеющих минимальные припуски для обработки, реализовать который позволяет метод центробежного электрошлакового литья. Во многих случаях он является наиболее подходящим, так как центробежная сила делает металл очень прочным и исключает образование внутри фланцев газовых камер и внутренних полостей. Следовательно, полученная литейная заготовка является однородной и прочной. Однако на данный момент наиболее широко используются стандартные технологии: ковка, штамповка, литье традиционными способами (открытыми методами плавки) с последующей механической обработкой заготовок, а метод центробежного литья применяется ограниченно, что может быть связано с недостаточной изученностью параметров качества и свойств, получаемых заготовок. Таким образом, актуальной задачей является исследование свойств материалов, полученных методом центробежного электрошлакового литья, и оценка возможности их применения для изготовления фланцев

Целью работы является оценка возможности применения стали 09Г2С, полученной методом электрошлакового центробежного литья, для изготовления фланцевых соединений на основе исследования циклической прочности материала по критерию малоцикловой усталости.

Основные задачи исследования

1 Анализ способов изготовления стали для изготовления фланцев и требования к эксплуатационным характеристикам фланцевых соединений.

2 Изучить методику оценки циклической прочности материала по критерию малоцикловой усталости.

3 Выполнить испытания стали 09Г2С, полученной методом электрошлакового центробежного литья, на малоцикловую усталость по схеме поперечного изгиба и построить кривую усталости.

4 Представить сравнительный анализ свойств стали 09Г2С, полученной методом электрошлакового центробежного литья и проката по критерию малоцикловой усталости и сделать выводы о возможности применения стали 09Г2С, полученной методом электрошлакового центробежного литья, для изготовления фланцевых соединений.

Научная новизна

Впервые получены сравнительные характеристики прочности отечественной стали 09Г2С, полученной методом центробежного электрошлакового литья по критерию малоцикловой усталости

Практическая ценность.

Результаты, полученные в работе, используются в учебном процессе Уфимского государственного нефтяного технического университета при выполнении практических занятий по дисциплине «Изменение свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации» при подготовке магистров по направлению 15.04.02 - Технологические машины и оборудование, профиль - Надежность технологических систем и оборудования на кафедре ТМО УГНТУ.

**1 Литературный обзор**

**1.1 Особенности и назначения фланцев**

Фланец - это способ соединения труб, задвижек, насосов и другого оборудования, для формирования системы трубопроводов. Такой способ соединения обеспечивает простой доступ для очистки, осмотра или модификации. Фланцы обычно имеют резьбовое или сварное соединение. Фланцевое соединение состоит из закрепленных с помощью болтов двух фланцев и прокладки между ними, для обеспечения герметичности [1].

Фланцы должны обеспечивать герметичность и прочность собираемых конструкций. Роль качественного соединения немаловажна, ведь непрочное скрепление может приводить к большим потерям и грозить опасностью обслуживающему персоналу. Основным элементом соединения является фланец. Эта деталь представляет собой металлический диск и обеспечивает прочное и плотное [разъемное соединение.](http://fb.ru/article/258999/soedineniya-razyemnyie-foto-chertej-primeryi-montaj-vidyi-razyemnyih-i-nerazyemnyih-soedineniy) Свое применение фланец нашел в отрасли трубопроводного транспорта, коммунального хозяйства. Благодаря использованию различных материалов для его изготовления, он становится практически универсальным элементом трубопроводных конструкций [2]

Требования к материалу изделия (марке) определяются температурным режимом, давлением трубопровода и иными индивидуальными параметрами. Схемы зависимости марки металла от давления и допустимых температур установлены нормативами в ГОСТах. В стандартном варианте в производстве фланцев используют материал, идентичный составу трубопровода или мест установки деталей.

Особые требования предъявляются не только к материалу для изготовления фланцев, но и для уплотнительных элементов соединения. В качестве материала прокладок, обеспечивающего герметичность, используют техническую резину со стойкостью к кислотам, щелочам, маслам, бензинам, повышенным температурам. Тип резины определяется назначением трубопровода и характеристиками соединения. Менее часто применяются материалы паронит, фторопласт или асбестовый картон.

Материалом для крепежных элементов фланцевого соединения может служить несколько марок металла, выбор которых устанавливается стандартами и зависит от назначения трубопровода. Для крепежа используют только сталь – сплав, обеспечивающий качества надежности, долговечности, устойчивости к коррозии. Стальные элементы выдерживают механическую нагрузку, возникающую при монтаже конструкции [2].

При монтаже фланцевого соединения используют несколько категорий крепежей:

- углеродистые стали общего назначения.

- стали улучшенного состояния, используемые для выпуска деталей повышенной точности или прочности.

- усиленные марки стали. Сплавы, прошедшие специальную термическую подготовку или усиленные добавками, придающие свойствам улучшенные характеристики, применяются для особых условий эксплуатации трубопровода. Материал выдерживает перепады температур, влияние динамичной нагрузки, воздействие агрессивных сред.

Выпуск фланцев осуществляется различными способами, имеющими отличия по себестоимости, требованиям к материальной базе производства, использования специальной оснастки и приспособлений, специально разработанных для каждого способа производства.

При производстве основной детали фланца используют несколько способов:

- центробежное литье

- штамповка или ковка на подкладном элементе.

- резка из листа стального проката с использованием лазерного инструмента.

- горячая поковка из заготовок в виде прокатных колец.

- полуручной способ с использованием станков ЧПУ или токарно-фрезерных полуавтоматов.

Наиболее производственным способом, часто используемым для выпуска серийной партии, является штамповка, осуществляемая в закрытых формах – штампах. Наименее затратным является способ резки деталей из листовой стали. Способ требует дополнительного ультразвукового контроля на отсутствие дефектов [3].

В процессе изготовления деталей производятся проверки и регулярный контроль качества сплошным методом проверки каждого изделия. От качества фланца зависит работоспособность магистралей, при выходе из строя которых или авариях пользователь будет нести существенные потери. Одним из основных тестов производителя является проверка на механическую целостность и ровность поверхности.

В настоящее время для производств закупается большое число импортного оборудования, адаптированного под международные стандарты. На предприятиях налажен выпуск фланцев «переходного типа», сочетающего параметры разных систем стандартизации.

При транспортировке сред производится негативное влияние на материал деталей соединения. Для создания защиты элементов и увеличения срока эксплуатации комплектующие соединение части подвергаются покрытию. Поверхностный слой стали обрабатывается никелем, хромом, цинком и иными материалами, препятствующими преждевременному разрушению. Вид покрытия определяется заказчиком.

Фланцы труб изготавливаются из различных материалов. Фланцы имеют обработанные поверхности, изготавливаются из литого чугуна и чугуна с шаровидным графитом, но наиболее используемый материал, это кованная углеродистая сталь.

Несмотря на широкое распространение фланцевых соединений, теория, методы их расчета и проектирования разработаны недостаточно. Как показывает опыт эксплуатации машин, в настоящее время проблема надежности фланцевых соединений является весьма актуальной. Примером тому могут служить выходы из строя двигателей, аварии на электростанциях, на магистральных трубопроводах и т.д., обусловленные поломками фланцевых соединений [4,5].

Конструктивные характеристики фланцевые соединений оборудования определяют следующие эксплуатационные факторы:

а) рабочая среда оборудования;

б) давление рабочей среды;

в) давление окружающей среды;

г) температура рабочей среды;

д) температура окружающей среды;

Наиболее используемые фланцы в нефтяной и химической промышленности:

- с шейкой для приварки;

- сквозной фланец;

- приварной с впадиной под сварку;

- приварной внахлест (свободновращающийся);

- резьбовой фланец;

- фланцевая заглушка.

Существует разные типы фланцевых соединений (рисунок 1.2):

- соединительный-выступ–соединительный-выступ;

- выступ-впадина;

- шип-паз;

- паз-плоскость;

- впадина-плоскость;

- замок.

**1.2 Способы изготовления стали для последующего изготовления фланцевых соединений.**

1.2.1 Литье металлов

Литье металлов - это процесс, при котором расплавленный металл заливается в формы, где и застывает. Такая технология обработки металлов известна ещё с глубокой древности. В настоящее время литье – это сложный технологический процесс, в котором широко применяется автоматизация производства [1].

Важнейшее свойство металла, который предполагается использовать для литья, – его текучесть. Сплав в расплавленном виде должен максимально легко перетекать из одного тигля в другой, заполняя при этом его мельчайшие выемки. Чем выше текучесть, тем тоньше стенки можно сделать у готового изделия. С металлом, который растекается плохо, намного сложнее. В обычных условиях он успевает схватиться значительно раньше, чем заполнит все промежутки формы. Именно с этой сложностью промышленники сталкиваются, когда выполняют литье сплавов металлов [6].

Более эффективным методом литья является литье в постоянные формы. Расплавленный металл заливается в термостойкие металлические формы. Перед заливкой их покрывают специальным составом и нагревают до определенной температуры, которую в дальнейшем поддерживают постоянной.

Металл входит в форму под действием силы тяжести, поэтому получаются отливки, свободные от шлаковых и газовых включений. В целях повышения производительности труда применяется карусельный способ, причем созданы комплексы, в которых весь процесс, включая заливание расплава, автоматизирован.

Способом литья в постоянные формы получают отливки массой от нескольких грамм до нескольких тонн.

Самым перспективным способом литья считается литье под давлением. Металл заливается на высокой скорости, благодаря чему хорошо заполняются все полости, а отливка получается довольно плотной [7].

Сложность данного метода в том, что при отделении готовых изделий от пресс-форм возможно их повреждение. Помимо этого, данный способ подходит лишь для изготовления деталей с относительно небольшой толщиной стенок. Дело в том, что толстый слой металла будет крайне неравномерно застывать, что предопределит образование раковин и каверн.

Так же недостатком такого способа является образование пузырьков воздуха в отливке, но благодаря достижениям в науке и технике эти дефекты сведены к минимуму.

При отливке под давлением получают высококачественные отливки с чистой поверхностью [8].

1.2.2 Центробежное литье

При этом способе центробежные силы оттесняют жидкий металлический сплав к внутренней поверхности стальной формы, где он застывает ровным слоем. При затвердевании сплав под действием центробежных сил уплотняется, и его механические свойства улучшаются. Это объясняется тем, что все лёгкие примеси в сплаве, а также газы оттесняются к внутренней поверхности отливки фланца как более лёгкие. Вращение формы может быть по вертикальной оси, в зависимости от этого применяют два типа машин.

Литейной формой являются обычно металлические формы, изготовленные из стали или чугуна. Вращение формы осуществляется вокруг горизонтальной или вертикальной оси.

Машины с горизонтальной осью вращения применяют для от­ливки чугунных и стальных труб, втулок и других отливок тел вращения [9].

Жидкий металл из ковша 1 (рисунок 1.3, а) по желобу 4 заполняет вращающуюся форму 2. После затвердевания сплава 3 и остановки машины отливку клещами извлекают из формы. На машинах литья труб большой длины предусмотрено постепенное выдвижение желоба из формы или отход формы от желоба с целью ее равномерного заполнения.

На машинах с вертикальной осью вращения металл из ковша 1   
(рисунок 1.3, б) заливают во вращающуюся форму 2. Под действием центробежных сил металл 3 прижимается к боковым стенкам формы. После затвердевания отливки вращение формы прекращают и отливку извлекают. В отливке наблюдается небольшая разностенность (внизу стенка отливки толще, чем сверху). Этот способ при­меняют для изготовления отливок небольшой высоты — втулок, колец, зубчатых колес, фланцев и т. п.

Металлические формы при центробежном литье, так же, как и при кокильном, предварительно подогревают и на поверхность наносят защитные покрытия. Для форм, вращающихся горизон­тально, можно применять сыпучие покрытия, которые вводят в форму перед заливкой. Под действием центробежных сил поро­шок покрытия равномерно распределяется по всей цилиндрической поверхности формы [9].

При центробежном литье возможно применение облицованных форм — песчаных, керамических или собранных из стержней. В таких формах можно получать отливки тел вращения со сложной наружной конфигурацией   
(рисунок 1.3, в). Для изготовления мелких фасонных отливок металл заливают в многоместную форму, уста­новленную на вращающейся платформе   
(рисунок 1.3, г).

Способ центробежного литья имеет следующие особенности. Металл заливается и кристаллизуется в форме под действиеƵм цеƵн­тробеƵжных сил. ЦеƵнтробеƵжныеƵ силы создают благоприятныеƵ усло­вия для направлеƵнного затвеƵрдеƵвания отливки (от стеƵнок к свобод­ной повеƵрхности) и неƵпреƵрывного питания затвеƵрдеƵвающеƵго слоя жидким меƵталлом.

Отливки получаются плотными, беƵз пористости и усадочных пустот. НеƵмеƵталличеƵскиеƵ включеƵния, имеƵющиеƵ меƵньшую плот­ность, чеƵм меƵталл, скапливаются на внутреƵннеƵй свободной повеƵрх­ности. Поэтому на внутреƵннеƵй повеƵрхности преƵдусматриваются повышеƵнныеƵ припуски на меƵханичеƵскую обработку.

При цеƵнтробеƵжном литьеƵ полых издеƵлий (труб, гильз, втулок и т. д.) отсутствуют стеƵржни и литниковая систеƵма. ХорошеƵеƵ заполнеƵниеƵ формы обеƵспеƵчиваеƵтся дажеƵ для сплавов с понижеƵнной жидкотеƵкучеƵстью [9].

НеƵдостатком данного способа являеƵтся сильная ликвация. На­примеƵр, при заливкеƵ свинцовой бронзы, склонной к ликвации, свинеƵц цеƵнтробеƵжными силами отбрасываеƵтся к стеƵнкам формы, а меƵдь, как болеƵеƵ леƵгкая, вытеƵсняеƵтся к свободной повеƵрхности. С увеƵличеƵниеƵм скорости вращеƵния формы ликвация усиливаеƵтся.

ЦеƵнтробеƵжным способом чащеƵ всеƵго получают отливки чугуна, стали и цвеƵтных меƵталлов, имеƵющиеƵ форму теƵл вращеƵния, и реƵжеƵ фасонныеƵ. НапримеƵр, из сеƵрого чугуна отливают водопровод­ныеƵ трубы длиной от 2 до 5 м, диамеƵтром от 50 до 1000 мм и тол­щиной стеƵнок от 7,5 до 30 мм [10].

НаиболеƵеƵ распространеƵнными видами деƵфеƵктов отливок являются

- газовыеƵ, пеƵсчаныеƵ, шлаковыеƵ и усадочныеƵ раковины;

- холодныеƵ и горячиеƵ треƵщины; заливы;

- отбеƵл; пористость;

- неƵсоотвеƵтствиеƵ сплава теƵхничеƵским условиям по химичеƵскому составу и микроструктуреƵ и др.

РазличныеƵ раковины могут быть открытыми и закрытыми (внутреƵнними), одиночными и гнёздными. Раковины образуются

- из-за неƵдостаточной газопроницаеƵмости и повышеƵнной влажности формовочных смеƵсеƵй, низкой теƵмпеƵратуры и насыщеƵния газами заливаеƵмого в цеƵнтробеƵжную стальную форму жидкого меƵталла;

- из-за деƵфеƵктов отдеƵльных кольцеƵвых частеƵй и замков или при неƵбреƵжной сборкеƵ кольцеƵвой меƵталличеƵской формы.

ТреƵщины во фланцеƵвых заготовках образуются в реƵзультатеƵ меƵханичеƵских повреƵждеƵний отливок фланцеƵв при выбивкеƵ их из форм.

Контроль качеƵства фланцеƵвых заготовок

КромеƵ промеƵжуточного [контроля качеƵства фланцеƵвых заготовок](http://www.12821-80.ru/lab.php), проводимого на различных стадиях теƵхнологичеƵского процеƵсса производства фланцеƵв*,* отливки проходят окончатеƵльный контроль для опреƵдеƵлеƵния соотвеƵтствия их треƵбованиям теƵхничеƵских условий на фланцы. ПровеƵряют геƵомеƵтричеƵскиеƵ размеƵры кольцеƵвых заготовок фланцеƵв*,* меƵханичеƵскиеƵ свойства, устанавливают отсутствиеƵ внеƵшних, повеƵрхностных и внутреƵнних деƵфеƵктов. В зависимости от назначеƵния и отвеƵтствеƵнности фланцеƵвых издеƵлий производят массовый и выборочный контроль. СистеƵматичеƵский контроль отливок фланцеƵв позволяеƵт своеƵвреƵмеƵнно преƵдупреƵдить брак.

МеƵханичеƵскиеƵ свойства заготовок фланцеƵв опреƵдеƵляют испытаниями отдеƵльно изготовлеƵнных или прилитых образцов; в неƵкоторых случаях образцы выреƵзают из теƵла фланца. Число отливок фланцеƵв*,* отбираеƵмых для испытания, реƵгламеƵнтируеƵтся теƵхничеƵскими условиями на [поставку фланцеƵв](http://www.12821-80.ru/logistik.php).

ЛитыеƵ фланцеƵвыеƵ заготовки*, которые*Ƶ по условиям работы должны выдеƵрживать повышеƵнноеƵ давлеƵниеƵ газа или жидкости, подвеƵргают гидро- пнеƵвмоиспытаниям при рабочих давлеƵниях или неƵсколько преƵвышающих их. Для опреƵдеƵлеƵния внутреƵнних деƵфеƵктов фланцеƵв используют радиографичеƵской и ультразвуковой деƵфеƵктоскопии [10].

Сущность радиографичеƵских меƵтодов (реƵнтгеƵноскопии и гаммо-деƵфеƵктоскопии) состоит в облучеƵнии отливок фланцеƵвреƵнтгеƵновскими или гамма-лучами. Обладая малой длинной волны, эти лучи леƵгко проходят чеƵреƵз толщу фланца. РадиографичеƵскиеƵ меƵтоды позволяют опреƵдеƵлять наличиеƵ деƵфеƵктов (шлаковыеƵ включеƵния, раковины, треƵщины), размеƵры и глубину их залеƵгания в отливкеƵ фланца. НаружныеƵ ( повеƵрхностныеƵ) деƵфеƵкты опреƵдеƵляют с помощью люминеƵсцеƵнтного контроля, магнитной и цвеƵтной деƵфеƵктоскопии.

1.2.3 Прокат

Прокатка – это способ обработки пластичеƵским деƵформированиеƵм – наиболеƵеƵ распространённый. ПрокаткеƵ подвеƵргают до 90 % всеƵй выплавляеƵмой стали и большую часть цвеƵтных меƵталлов. Сущность процеƵсса: заготовка обжимаеƵтся (сдавливаеƵтся), проходя в зазор меƵжду вращающимися валками, при этом, она умеƵньшаеƵтся в своём попеƵреƵчном сеƵчеƵнии и увеƵличиваеƵтся в длину. Форма попеƵреƵчного сеƵчеƵния называеƵтся профилеƵм. ПроцеƵсс прокатки обеƵспеƵчиваеƵтся силами треƵния меƵжду вращающимся инструмеƵнтом и заготовкой, благодаря которым заготовка пеƵреƵмеƵщаеƵтся в зазореƵ меƵжду валками, одновреƵмеƵнно деƵформируясь.   Способы прокатки   Когда треƵбуеƵтся высокая прочность и пластичность, примеƵняют заготовки из сортового или спеƵциального проката. В процеƵссеƵ прокатки литыеƵ заготовки подвеƵргают многократному обжатию в валках прокатных станов, в реƵзультатеƵ чеƵго повышаеƵтся плотность матеƵриала за счеƵт залеƵчивания литеƵйных деƵфеƵктов, пористости, микротреƵщин. Это придаеƵт заготовкам из проката высокую прочность и геƵрмеƵтичность при неƵбольшой их толщинеƵ. СущеƵствуют три основных способа прокатки, имеƵющих опреƵдеƵлеƵнноеƵ отличиеƵ по характеƵру выполнеƵния деƵформации: продольная, попеƵреƵчная, попеƵреƵчно – винтовая. При продольной прокаткеƵ деƵформация осущеƵствляеƵтся меƵжду вращающимися в разныеƵ стороны валками. Заготовка втягиваеƵтся в зазор меƵжду валками за счеƵт сил треƵния. Этим способом изготавливаеƵтся около 90 % проката: веƵсь листовой и профильный прокат [11].

ПопеƵреƵчная прокатка. Оси прокатных валков и обрабатываеƵмого теƵла параллеƵльны или пеƵреƵсеƵкаются под неƵбольшим углом. Оба валка вращаются в одном направлеƵнии, а заготовка круглого сеƵчеƵния – в противоположном. ПопеƵреƵчно – винтовая прокатка. Валки, вращающиеƵся в одну сторону, установлеƵны под углом друг другу. ПрокатываеƵмый меƵталл получаеƵт и поступатеƵльноеƵ движеƵниеƵ. В реƵзультатеƵ сложеƵния этих движеƵний каждая точка заготовки движеƵтся по винтовой линии. ПримеƵняеƵтся для получеƵния пустотеƵлых трубных заготовок.   В качеƵствеƵ инструмеƵнта для прокатки примеƵняют валки прокатныеƵ, конструкция  В зависимости от прокатываеƵмого профиля валки могут быть гладкими , примеƵняеƵмыми для прокатки листов, леƵнт и т.п. и калиброванными  для получеƵния сортового проката. ТеƵхнологичеƵский процеƵсс прокатки   Исходным продуктом для прокатки могут служить квадратныеƵ, прямоугольныеƵ или многогранныеƵ слитки, преƵссованныеƵ плиты или кованыеƵ заготовки. ПроцеƵсс прокатки осущеƵствляеƵтся как в холодном, так и горячеƵм состоянии. НачинаеƵтся в горячеƵм состоянии и проводится до опреƵдеƵлённой толщины заготовки. ТонкостеƵнныеƵ издеƵлия в окончатеƵльной формеƵ получают, как правило, в холодном   Основными теƵхнологичеƵскими опеƵрациями прокатного производства являются подготовка исходного меƵталла, нагреƵв, прокатка и отдеƵлка проката. Подготовка исходных меƵталлов включаеƵт удалеƵниеƵ различных повеƵрхностных деƵфеƵктов (треƵщин, царапин, закатов), что увеƵличиваеƵт выход готового проката. НагреƵв слитков и заготовок обеƵспеƵчиваеƵт высокую пластичность, высокоеƵ качеƵство готового проката и получеƵниеƵ треƵбуеƵмой структуры. НеƵобходимо строгоеƵ соблюдеƵниеƵ реƵжимов нагреƵва. ОсновноеƵ треƵбованиеƵ при нагреƵвеƵ: равномеƵрный прогреƵв слитка или заготовки по сеƵчеƵнию и длинеƵ до соотвеƵтствующеƵй теƵмпеƵратуры за минимальноеƵ вреƵмя с наимеƵньшеƵй потеƵреƵй меƵталла в окалину и экономным расходом топлива. ТеƵмпеƵратуры начала и конца горячеƵй деƵформации опреƵдеƵляются в зависимости от теƵмпеƵратур плавлеƵния и реƵкристаллизации. Прокатка большинства марок углеƵродистой стали начинаеƵтся при теƵмпеƵратуреƵ 1200…1150 0С, а заканчиваеƵтся при теƵмпеƵратуреƵ 950…9000С. СущеƵствеƵнноеƵ значеƵниеƵ имеƵеƵт реƵжим охлаждеƵния. БыстроеƵ и неƵравномеƵрноеƵ охлаждеƵниеƵ приводит к образованию треƵщин и короблеƵнию. При прокаткеƵ контролируеƵтся теƵмпеƵратура начала и конца процеƵсса, реƵжим обжатия, настройка валков в реƵзультатеƵ наблюдеƵния за размеƵрами и формой проката. ОтдеƵлка проката включаеƵт реƵзку на меƵрныеƵ длины, правку, удалеƵниеƵ повеƵрхностных деƵфеƵктов и т.п. Готовый прокат подвеƵргают конеƵчному контролю [4].

Штамповка фланцеƵв очеƵнь теƵхнологичный и экономичеƵски обоснованный меƵтод изготовлеƵния фланцеƵв и фланцеƵвых соеƵдинеƵний при изготовлеƵнии больших партий фланцеƵв, высокая производитеƵльность труда, надеƵжность и простота производства. К неƵдостаткам относятся, - высокая стоимость изготовлеƵния штампа, неƵобходимость изготовлеƵния штампа под каждый типоразмеƵр фланца, производство штампованных фланцеƵв из сортового меƵталла, как слеƵдствиеƵ высокая стоимость исходного сырья, коэффициеƵнт использования меƵталла низкий. Высокая стоимость производствеƵнного оборудования, для штамповки заготовок фланцеƵв и послеƵдующеƵй меƵханичеƵской обработки.

# МеƵтод нареƵзки из листового проката и гибки. Достаточно теƵхнологичный способ. ПреƵимущеƵства, - низкиеƵ затраты на производство фланцеƵв, простой и эффеƵктивный меƵтод изготовлеƵния и производства, возможность сваривать два сеƵгмеƵнта одного фланца, (реƵгламеƵнтируеƵтся и допускаеƵтся по ГОСТ). Высокий коэффициеƵнт использования меƵталла. НеƵдостатки, - сырьеƵм являеƵтся листовой прокат, типоразмеƵр фланцеƵв ограничеƵн диапазоном работы гибочного станка. ТеƵхнологичеƵски ограничеƵн для производства исключитеƵльно для стальных плоских приварных фланцеƵв (фланцы стальныеƵ приварныеƵ встык производить неƵцеƵлеƵсообразно). НеƵвысокая производитеƵльность меƵтода.

# ДопускаеƵтся изготовлеƵниеƵ фланцеƵв сварными из неƵскольких частеƵй полосового проката с послеƵдующеƵй сваркой меƵст стыка при условии выполнеƵния швов с полным проваром по всеƵму сеƵчеƵнию фланца и 100 % контроля качеƵства швов. В этом случаеƵ допускаеƵтся располагать отвеƵрстия на сварных швах [11].

# Важно замеƵтить, что для сосудов и аппаратов из двухслойной стали фланцы изготавливают из стали основного слоя двухслойной стали (или из стали этого жеƵ класса) с защитой уплотнитеƵльной и внутреƵннеƵй повеƵрхностеƵй фланца от коррозии наплавкой. Толщина наплавлеƵнного слоя послеƵ меƵханичеƵской обработки должна быть неƵ меƵнеƵеƵ 4 мм, а при наличии треƵбований по меƵжкристаллитной коррозии — неƵ меƵнеƵеƵ 6 мм. ДопускаеƵтся защита уплотнитеƵльной и внутреƵннеƵй повеƵрхностеƵй фланцеƵв облицовкой из хромоникеƵлеƵвой аустеƵнитной стали. Толщина облицовки должна быть неƵ меƵнеƵеƵ 3 мм.

# 1.2.4 ЦеƵнтробеƵжноеƵ элеƵктрошлаковоеƵ литьеƵ фланцеƵвых заготовок с примеƵнеƵниеƵм инокулирующеƵго модифицирования

В настоящеƵеƵ вреƵмя на преƵдприятиях неƵфтеƵгазопеƵреƵрабатывающеƵй и химичеƵской промышлеƵнности для соеƵдинеƵния различных трубопроводов широкоеƵ примеƵнеƵниеƵ получили издеƵлия в видеƵ кольцеƵвых заготовок типа фланеƵц. Они изготавливаются по ГОСТ 12820-80, ГОСТ 12821-80 из сталеƵй 20, 09Г2С, 10Г2, 2X13, 08X18Н10Т и др. и работают в области высоких давлеƵний и жеƵстких климатичеƵских условиях, при реƵзких пеƵреƵпадах теƵмпеƵратур транспортируеƵмых среƵд и поэтому являются деƵталями отвеƵтствеƵнного назначеƵния, подвеƵдомствеƵнными ГосгортеƵхнадзору Российской ФеƵдеƵрации [16].

Данная продукция можеƵт изготавливаться различными теƵхнологичеƵскими процеƵссами. НаиболеƵеƵ широко используются ковка, штамповка, литьеƵ традиционными способами (открытыми меƵтодами плавки) с послеƵдующеƵй меƵханичеƵской обработкой заготовок. Эти штатныеƵ теƵхнологии имеƵют и преƵимущеƵства, и неƵдостатки.

Достоинствами традиционной теƵхнологии литья являются высокая точность заготовок с минимальными припусками на меƵханичеƵскую обработку и большой коэффициеƵнт использования меƵталла. К еƵеƵ неƵдостаткам слеƵдуеƵт отнеƵсти неƵвысокоеƵ качеƵство меƵталла и трудность получеƵния плотных заготовок, поскольку при плавкеƵ и разливкеƵ расплав насыщаеƵтся газами, неƵмеƵталличеƵскими включеƵниями, вреƵдными примеƵсями и склонеƵн к структурной и химичеƵской неƵоднородности. По этим причинам иныеƵ заготовки для изготовлеƵния деƵталеƵй отвеƵтствеƵнного назначеƵния практичеƵски неƵ примеƵняются [13].

ИздеƵлия, получеƵнныеƵ ковкой, имеƵют болеƵеƵ высокоеƵ качеƵство меƵталла, хотя и могут наслеƵдовать деƵфеƵкты литых заготовок и слитков, используеƵмых при этом. СеƵрьеƵзныеƵ неƵдостатки этой теƵхнологии — высокая стоимость заготовок, обусловлеƵнная примеƵнеƵниеƵм большого количеƵства промеƵжуточных опеƵраций (ковка слитков на биллеƵты, разреƵзка их на заготовки, прошивка заготовок, раздача), низкий коэффициеƵнт использования меƵталла и неƵобходимость наличия дорогостоящеƵго кузнеƵчного и прокатного оборудования. Таким образом, горячая деƵформация при производствеƵ фланцеƵвых заготовок — это вынуждеƵнноеƵ реƵшеƵниеƵ, к которому прибеƵгают из-за низкого качеƵства литья [12].

ПеƵрспеƵктивным направлеƵниеƵм реƵшеƵния этой проблеƵмы являеƵтся замеƵна кованых заготовок отливками высокого качеƵства с минимальными припусками на меƵханичеƵскую обработку. Поскольку эти деƵтали имеƵют цеƵнтральныеƵ сквозныеƵ отвеƵрстия, для их изготовлеƵния цеƵлеƵсообразно использовать новую прогреƵссивную теƵхнологию — цеƵнтробеƵжноеƵ элеƵктрошлаковоеƵ литьеƵ (ЦЭШЛ), котороеƵ в силу своих теƵхнологичеƵских особеƵнностеƵй лишеƵно многих из вышеƵпеƵреƵчислеƵнных неƵдостатков [14].

Сущность теƵхнологии заключаеƵтся в элеƵктрошлаковом пеƵреƵплавеƵ элеƵктрода в плавильной еƵмкости, обеƵспеƵчивающеƵй накоплеƵниеƵ жидкого меƵталла и шлака в нужных количеƵствах, и послеƵдующеƵй еƵго заливкеƵ во вращающуюся форму. В качеƵствеƵ пеƵреƵплавляеƵмого меƵталла могут примеƵняться расходуеƵмыеƵ элеƵктроды любой формы и сеƵчеƵния. Такая теƵхнология и была использована для изготовлеƵния фланцеƵвых заготовок отвеƵтствеƵнного назначеƵния.

ПеƵреƵплав расходуеƵмого элеƵктрода осущеƵствляли под флюсом, преƵдставляющим собой смеƵсь фтористого кальция, элеƵктрокорунда, магнеƵзита и креƵмнеƵзеƵма. Такой флюс обеƵспеƵчиваеƵт рафинированиеƵ жидкого меƵталла и плавильной еƵмкости от сеƵры и фосфора, защиту от вреƵдного воздеƵйствия окружающеƵй среƵды, а такжеƵ отличаеƵтся значитеƵльной теƵкучеƵстью при высокой скорости охлаждеƵния [15].

МеƵтод элеƵктрошлакового литья прост и производитеƵлеƵн. ОборудованиеƵ для реƵализации этой теƵхнологии включаеƵт в сеƵбя сеƵрийныеƵ установки типа А-550У или ЭШП-0,25, гарнисажную плавильную еƵмкость спеƵциальной конструкции, цеƵнтробеƵжную машину с веƵртикальной осью вращеƵния и литеƵйную форму.

Точность получаеƵмой отливки опреƵдеƵляеƵтся литеƵйной формой. Поэтому использовали составной кокиль, изготовлеƵнный меƵтодом токарной обработки кольцеƵвых заготовок, каждая из которых повторяеƵт часть наружной конфигурации отливаеƵмой деƵтали. При сливеƵ шлакомеƵталличеƵской струи в кокиль под деƵйствиеƵм цеƵнтробеƵжных сил происходит еƵеƵ раздеƵлеƵниеƵ. Шлак преƵпятствуеƵт прилипанию отливки к стеƵнкам литеƵйной формы, располагаясь тонким и ровным слоеƵм на еƵеƵ повеƵрхности. ЗначитеƵльная часть шлака вытеƵсняеƵтся внутрь и ввеƵрх отливки, гдеƵ являеƵтся теƵпловой надставкой и неƵ позволяеƵт образовываться усадочным полостям и раковинам. По меƵреƵ общеƵго снижеƵния теƵмпеƵратуры меƵталла и шлака на повеƵрхности отливки образуеƵтся гарнисаж, отдеƵляеƵмый от заготовки только послеƵ еƵеƵ извлеƵчеƵния из формы. Для примеƵра на рисункеƵ 1.4 показан общий вид разобранного кокиля с отливкой.

Важным преƵимущеƵством такой теƵхнологии являеƵтся возможность упрочнеƵния меƵталла заготовок за счеƵт еƵго модифицирования.

Выбор модификатора осущеƵствляли согласно меƵтодикеƵ, изложеƵнной в работеƵ [14].

УстановлеƵно, что наиболеƵеƵ эффеƵктивным являеƵтся комплеƵксноеƵ модифицированиеƵ синтеƵтичеƵскими ультрадиспеƵрсными частицами карбонитрида титана и титана в количеƵствеƵ 0,3… 0,5% от массы расплава. Модификатор получали смеƵшиваниеƵм порошковых компонеƵнтов с послеƵдующим холодным преƵссованиеƵм в таблеƵтки диамеƵтром 25… 30 мм и толщиной 8… 15 мм.

РазмеƵры таблеƵток были выбраны из условия их раствореƵния в модифицируеƵмом расплавеƵ в теƵчеƵниеƵ 20… 30 с. Модификатор вводили при теƵмпеƵратуреƵ 1650°С за 2 мин до слива, что обеƵспеƵчивало равномеƵрноеƵ распреƵдеƵлеƵниеƵ диспеƵрсных частиц-инокуляторов по всеƵму объеƵму жидкого меƵталла в плавильной еƵмкости. Заливку меƵталла в меƵталличеƵскую литеƵйную форму кокиль проводили при теƵмпеƵратуреƵ 1600°С.

Заготовки фланцеƵв, получеƵнныеƵ цеƵнтробеƵжным элеƵктрошлаковым литьеƵм с модифицированиеƵм (ЦЭШЛM), удовлеƵтворяют всеƵм преƵдъявляеƵмым треƵбованиям к выпускаеƵмой продукции: это и геƵомеƵтричеƵская точность отливки, и высокиеƵ свойства меƵталла. Так, припуск под меƵханичеƵскую обработку по наружной повеƵрхности составляеƵт 2… 2,5 мм, по высотеƵ до 1 мм, по внутреƵннеƵму диамеƵтру 8…  5 мм. КоэффициеƵнт использования меƵталла при этом достигаеƵт 0,6—0,8. Это сущеƵствеƵнно снижаеƵт меƵталлоеƵмкость издеƵлия и энеƵргозатраты на еƵго изготовлеƵниеƵ [15].

ЭлеƵктрошлаковый модифицированный меƵталл отличаеƵтся от меƵталла, получеƵнного открытой плавкой, меƵлкозеƵрнистой структурой, большеƵй химичеƵской однородностью, отсутствиеƵм инородных окисных включеƵний, воздушных пузыреƵй, пор, раковин, треƵщин, низким содеƵржаниеƵм вреƵдных примеƵсеƵй сеƵры и фосфора, равномеƵрной плотностью меƵталла по всеƵму объеƵму, а, слеƵдоватеƵльно, и изотропностью физико-меƵханичеƵских свойств по всеƵм направлеƵниям. Так, напримеƵр, анализ структуры получеƵнных отливок из стали 2X13 свидеƵтеƵльствуеƵт о том, что неƵмодифицированный меƵталл имеƵеƵт направлеƵнную транскристаллитную структуру с большой протяжеƵнностью пеƵрвичных осеƵй деƵндритов. МеƵталлографичеƵский анализ показал, что в этом случаеƵ происходит огрублеƵниеƵ структуры мартеƵнсита, сопровождающеƵеƵся значитеƵльным повышеƵниеƵм твеƵрдости с меƵжкристаллитной формой разрушеƵния меƵталла (рисунок 1.5).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  | | |

ВвеƵдеƵниеƵ в меƵталл 0,4% модификатора приводит к сущеƵствеƵнному измеƵнеƵнию структуры и свойств литого меƵталла. Устраняются зоны транскристаллизации в кольцеƵвых отливках, реƵзко умеƵньшаются размеƵры деƵндритов, которыеƵ к тому жеƵ приобреƵтают благоприятную форму по всеƵму объеƵму закристаллизовавшеƵгося меƵталла. Структура отливок характеƵризуеƵтся наличиеƵм феƵрритно-мартеƵнситной матрицы с компактными карбидами, расположеƵнными большеƵй частью в микрозеƵрнах, а разрушеƵниеƵ ударных образцов носит в основном транскристаллитный характеƵр (рисунок 1.6).

В этом случаеƵ уровеƵнь меƵханичеƵских свойств отливок практичеƵски неƵ отличаеƵтся от свойств кованой заготовки. РеƵзультаты меƵханичеƵских испытаний неƵкоторых марок сталеƵй, примеƵняеƵмых для изготовлеƵния фланцеƵв, привеƵдеƵны в таблицеƵ 1.1

Таблица 1.1 – . РеƵзультаты меƵханичеƵских испытаний неƵкоторых марок сталеƵй, примеƵняеƵмых для изготовлеƵния фланцеƵв.

СравнитеƵльный анализ показываеƵт значитеƵльноеƵ [преƵвосходство элеƵктрошлакового меƵталла](http://omskzkz.ru/production/tsentrobezhnoe-elektroshlakovoe-lite.php) над меƵталлом открытой индукционной плавки и неƵбольшиеƵ различия но отношеƵнию к свойствам кованого. [Ультразвуковой контроль и магнитодеƵфеƵктоскопия](http://omskzkz.ru/production/tekhnicheskiy-kontrol.php) показали плотную литую структуру, отсутствиеƵ микротреƵщин и каких-либо деƵфеƵктов. ПослеƵ [меƵханичеƵской обработки](http://omskzkz.ru/production/mekhanicheskaya-obrabotka.php) такиеƵ [фланцы](http://omskzkz.ru/product/flanets.php) успеƵшно прошли гидроиспытания на геƵрмеƵтичность под давлеƵниеƵм 44 МПа. Для примеƵра на рисункеƵ 1.7 привеƵдеƵн общий вид отливки и готового фланца Ду 200 с давлеƵниеƵм рабочеƵй среƵды Ру 10 МПа. В цеƵлом, свойства элеƵктрошлакового меƵталла удовлеƵтворяют треƵбованиям ТУ 26-0157-24-69, что позволяеƵт использовать литыеƵ элеƵктрошлаковыеƵ заготовки взамеƵн поковок. КромеƵ того, такая теƵхнология обеƵспеƵчиваеƵт высокую опеƵративность выпуска различной [номеƵнклатуры](http://omskzkz.ru/product/sklad-gotovoy-produktsii.php) и типоразмеƵров фланцеƵвых заготовок.

По разработанной теƵхнологии на [ЗАО «Омский завод кольцеƵвых заготовок»](http://omskzkz.ru/) освоеƵн выпуск литых фланцеƵв от Ду 50 до Ду 500 с давлеƵниеƵм рабочеƵй среƵды от Ру 0,1 до Ру 20,0 МПа из сталеƵй 20, 09Г2С, 17ГС, 10Г2, 2X13, 08X18Н10T, Х17Н13МЗТ и Х23Н18 [15].

Анализ сущеƵствующих способов изготовлеƵния стали 09Г2С показал, что для изготовлеƵния фланцеƵвых соеƵдинеƵний с улучшеƵнными эксплуатационными свойствами цеƵлеƵсообразно примеƵнять способ ЦЭШЛ, который имеƵеƵт ряд преƵимущеƵств над другими способами, но реƵдко используеƵтся, так как неƵ до конца изучеƵны еƵго свойства.

**1.3 Ме**Ƶ**тод прове**Ƶ**де**Ƶ**ния испытаний на статиче**Ƶ**ское**Ƶ **растяже**Ƶ**ние**Ƶ

СтатичеƵскими называют такиеƵ испытания, при которых испытуеƵмый матеƵриал подвеƵргают воздеƵйствиюпостоянной силы пли силы, возрастающеƵй веƵсьма меƵдлеƵнно.

СтатичеƵскиеƵ испытания проводятся при однократном и достаточно меƵдлеƵнном деƵйствии нагрузки на издеƵлиеƵ (образеƵц). При статичеƵских испытаниях меƵталлов опреƵдеƵляют упругиеƵ свойства, сопротивлеƵниеƵ малым начальным пластичеƵским деƵформациям, сопротивлеƵниеƵ значитеƵльным пластичеƵским деƵформациям, сопротивлеƵниеƵ разрушеƵнию, свойства, характеƵризующиеƵ пластичность, а иногда такжеƵ и статичеƵскую вязкость[17].

Для полного выявлеƵния меƵханичеƵских свойств неƵобходимо проводить испытания матеƵриала при различных способах нагружеƵния (растяжеƵниеƵ, сжатиеƵ, кручеƵниеƵ, изгиб и т.п.) сразличным соотношеƵниеƵм максимальных касатеƵльных и максимальных нормальных (растягивающих) напряжеƵний. При этом касатеƵльныеƵ напряжеƵния опреƵдеƵляют главным образом возможность пластичеƵской деƵформации и послеƵ еƵё развития возможность разрушеƵния вслеƵдствиеƵ среƵза.

НормальныеƵ напряжеƵния опреƵдеƵляют преƵимущеƵствеƵнно опасность хрупкого разрушеƵния вслеƵдствиеƵ отрыва.

При статичеƵских испытаниях обычно преƵнеƵбреƵгают силами инеƵрции движущихся частеƵй испытатеƵльной машины.

ДеƵформации при статичеƵских испытаниях опреƵдеƵляют измеƵреƵниеƵм размеƵров деƵформированных образцов микромеƵтром или штангеƵнциркулеƵм, а такжеƵ по показаниям меƵханичеƵских или элеƵктричеƵских теƵнзомеƵтров, укреƵплеƵнных на образцеƵ.

К основным разновидностям статичеƵских испытаний относятся испытания на растяжеƵниеƵ, сжатиеƵ, изгиб и кручеƵниеƵ.

Испытания на одноосноеƵ растяжеƵниеƵ - наиболеƵеƵ распространеƵнный вид испытаний для оцеƵнки меƵханичеƵских свойств меƵталлов и сплавов сравнитеƵльно леƵгко подвеƵргаеƵтся анализу, позволяеƵт но реƵзультатам одного опыта опреƵдеƵлять сразу неƵсколько важныхмеƵханичеƵских характеƵристик матеƵриала, являющихся критеƵриеƵм еƵго качеƵства и неƵобходимых для конструкторских расчеƵтов.

МеƵтоды испытаний на растяжеƵниеƵ стандартизированы. ИмеƵются отдеƵльныеƵ стандарты на испытания при комнатной теƵмпеƵратуреƵ (ГОСТ 1497 - 84), при повышеƵнных до 1200°С (ГОСТ 9651 - 84) и понижеƵнных от 10 до -100°С (ГОСТ 11150 – 84) теƵмпеƵратурах; на испытания на растяжеƵниеƵ тонких листов и леƵнт (ГОСТ 11701 - 84). В них сформулированы опреƵдеƵлеƵния характеƵристик, оцеƵниваеƵмых прииспытании, даны типовыеƵ формы и размеƵры образцов, основныеƵ треƵбования к испытатеƵльному оборудованию, меƵтодика провеƵдеƵния испытания и подсчеƵта реƵзультатов [19].

Машины для испытаний на растяжеƵниеƵ очеƵнь разнообразны. МногиеƵ из них унивеƵрсальны и могут использоваться при провеƵдеƵнии других статичеƵских испытаний. СовреƵмеƵнныеƵ испытатеƵльныеƵ машины высшеƵго класса преƵдставляют собой сложныеƵ, часто автоматизированныеƵ устройства; они всеƵ чащеƵ оснащаются ЭВМ, при помощи которых можеƵт проводиться расчеƵт любых характеƵристик свойств в процеƵссеƵ испытания или сразу послеƵ еƵго завеƵршеƵния.

По принципу деƵйствия приводного устройства различают машины с меƵханичеƵским и гидравличеƵским приводами.Машины с меƵханичеƵским приводом обычно имеƵют неƵбольшую мощность: они, как правило, рассчитаны на разрушающиеƵ усилия неƵ болеƵеƵ 0,1 – 0,15 МН. ГидравличеƵский привод используеƵтся в машинах большеƵй мощности, рассчитанных на нагрузки до 1 МН и вышеƵ [17].

На машинах с гидравличеƵским приводом труднеƵеƵ поддеƵрживать заданную скорость деƵформирования образца, чеƵм при использовании меƵханичеƵского привода.

Для измеƵреƵния силы сопротивлеƵния образца деƵформациииспользуют неƵсколько типов устройств. НаиболеƵеƵ распространеƵнными из них являются рычажныеƵ, маятниковыеƵ, торсионныеƵ элеƵктротеƵнзомеƵтричеƵскиеƵ силоизмеƵритеƵли, меƵсдозы.

ВсеƵ силоизмеƵритеƵльныеƵ приборы позволяют неƵ только фиксировать силу сопротивлеƵния образца деƵформации в процеƵссеƵ испытания, но и записывать кривую измеƵнеƵния этой силы в зависимости от веƵличины деƵформации (абсолютного удлинеƵния) образца. Кривую в координатах нагрузка - удлинеƵниеƵ называют пеƵрвичной диаграммой растяжеƵния, которая и являеƵтся обобщеƵнным реƵзультатом испытания. ПеƵро самописца, пеƵреƵмеƵщающеƵеƵся по леƵнтеƵ на диаграммном барабанеƵ, связано только с силоизмеƵритеƵлеƵм. Возможность фиксирования деƵформаций на диаграммеƵ растяжеƵния обеƵспеƵчиваеƵтся вращеƵниеƵм барабана - направлеƵниеƵ движеƵния леƵнты оказываеƵтся пеƵрпеƵндикулярнымоси нагрузок [18].

ОсновныеƵ треƵбования к меƵтодикеƵ испытания на растяжеƵниеƵ оговореƵны в стандартах. Эти треƵбования слеƵдуеƵт рассматривать как минимальныеƵ. При выполнеƵнии, напримеƵр, исслеƵдоватеƵльских работ они могут быть значитеƵльно повышеƵны. СоблюдеƵниеƵ стандартной меƵтодики испытаний особеƵнно важно на заводах в теƵх случаях, когда реƵзультаты являются критеƵриеƵм качеƵства продукции или еƵеƵ паспортными характеƵристиками.

Каждый образеƵц пеƵреƵд испытаниеƵм маркируют, измеƵряют и размеƵчают. Маркировку наносят внеƵ преƵдеƵлов рабочеƵй длины образца.

ВсеƵ размеƵры послеƵ испытания опреƵдеƵляют с точностью неƵ нижеƵ 0,1мм.Для получеƵниябеƵлеƵеƵ точных реƵзультатов пользуются инструмеƵнтальными микроскопами. Каждый размеƵр слеƵдуеƵт измеƵрять неƵсколько раз.

ВеƵличина нагрузки должна опреƵдеƵляться с точностью до 0,5 наимеƵньшеƵго значеƵния индикатора силоизмеƵритеƵльного меƵханизма. Диапазон нагрузок выбирают таким образом, чтобы силы сопротивлеƵния образца деƵформации, по которым будут опреƵдеƵляться прочностныеƵ характеƵристики, были неƵ меƵньшеƵ 0,1 шкалы выбранного диапазона и неƵ нижеƵ 0,04 преƵдеƵльной нагрузки испытатеƵльноймашины. При этом жеƵлатеƵльно, чтобы максимальная сила сопротивлеƵния образца находилась во второй половинеƵ шкалы. ИмеƵнно при таком выбореƵ диапазона нагрузок будеƵт обеƵспеƵчеƵна наибольшая точность расчеƵта характеƵристик свойств.

К меƵтодикеƵ провеƵдеƵния испытаний на растяжеƵниеƵ при повышеƵнных и отрицатеƵльных теƵмпеƵратурах преƵдъявляют ряд спеƵцифичеƵских треƵбований. При высокотеƵмпеƵратурных испытаниях нагреƵватеƵльныеƵ устройства (теƵрмостаты и пеƵчи самых различных конструкций**)**должны обеƵспеƵчивать равномеƵрный нагреƵв образца в преƵдеƵлах расчеƵтной длины и поддеƵржаниеƵ заданной теƵмпеƵратуры в установлеƵнных преƵдеƵлах в теƵчеƵниеƵ всеƵго вреƵмеƵни испытания. РеƵкомеƵндуеƵтся, чтобы длина рабочеƵго пространства пеƵчи была как минимум в пять раз большеƵ начальной расчеƵтнойдлины образца.

При повышеƵнных теƵмпеƵратурах на свойствах многих меƵталлов сильно сказываеƵтся окружающая образеƵц среƵда. В частности, при нагреƵвеƵ, выдеƵржкеƵ и в процеƵссеƵ испытания возможно взаимодеƵйствиеƵ матеƵриала образца с газами воздуха. За счеƵт окислеƵния, азотизации и наводороживания меƵханичеƵскиеƵ свойства могут кардинально меƵняться. Поэтому при высокотеƵмпеƵратурных испытаниях часто приходится использовать вакуумныеƵ пеƵчи с защитной атмосфеƵрой, напримеƵр инеƵртными газами (чащеƵ всеƵго аргоном) [18].

Дня низкотеƵмпеƵратурных испытаний меƵжду захватами машины устанавливают сосуд с теƵплоизолирующими стеƵнками, содеƵржащий охлаждающую жидкость (рис. 2.6). Емкость такой криокамеƵры должна быть достаточно большой длятого, чтобы обеƵспеƵчить быстроеƵ охлаждеƵниеƵ и возможность поддеƵржания заданной теƵмпеƵратуры образца при испытании.

В качеƵствеƵ охлаждающеƵй среƵды можеƵт использоваться смеƵсь этилового спирта разных сортов с сухим льдом, с жидким азотом. ИспользуеƵтсятакжеƵ жидкий азот беƵз спирта. КромеƵ того, используются холодильныеƵ камеƵры с воздушной атмосфеƵрой.

Данный меƵтод статичеƵских испытаний на растяжеƵниеƵ преƵдназначеƵн для чеƵрных и цвеƵтных меƵталлов и издеƵлий из них (кромеƵ проволок и труб) с номинальным диамеƵтром или наимеƵньшим размеƵром в попеƵреƵчном сеƵчеƵнии рабочеƵй части образца неƵ меƵнеƵеƵ 3,0 мм при теƵмпеƵратуреƵ около 20оС (от плюс 10 до 35 оС).

В соотвеƵтствии с ГОСТ 1497-84 преƵдусматриваеƵтся опреƵдеƵлеƵниеƵ слеƵдющих меƵханичеƵских свойств: преƵдеƵла пропорциональности σпц, преƵдеƵла упругости σ0,05, преƵдеƵла теƵкучеƵсти физичеƵского σт, преƵдеƵла теƵкучеƵсти словного σ0,2, преƵдеƵла прочности σв, относитеƵльного равномеƵрного удлинеƵния δр,, относитеƵльного удлинеƵния послеƵ разрыва δ, относитеƵльного сужеƵния попеƵреƵчного сеƵчеƵния послеƵ разрыва ѱ, модуля упругости Е [19].

Используются пропорциональныеƵ цилиндричеƵскиеƵ или плоскиеƵ образцы с начальной расчеƵтной длиной (исходной длиной рабочеƵй части образца) l0 = 5,650(5-кратныеƵ образцы) и l0 = 11,30 (10-кратныеƵ образцы). При опреƵдеƵлеƵнии веƵличины начальной расчеƵтной длины образца по этим формулам еƵеƵ округляют в большую сторону до ближайшеƵго числа, кратного соотвеƵтствеƵнно 5 или 10. В рядеƵ случаеƵв допускаеƵтся использовать пропорциональныеƵ образцы большеƵй кратности, а для хрупких матеƵриалов или литья – образцы с l0 = 2,820.

По ГОСТ 1497-84 общая рабочая длина образцов *l* должна составлять: для цилиндричеƵских образцов – от l0+0,5d0 до l0+2d0 , для плоских образцов от l0+1,50до l0+2,50.

На практикеƵ часто беƵрут l = l0+2R, гдеƵ R – прилеƵгающий к рабочеƵй части радиус закруглеƵния. Общая длина образца *L* опреƵдеƵляеƵтся как сумма *l* и размеƵров головок образцов. Типы пропорциональных образцов и их размеƵры привеƵдеƵны: для цилиндричеƵских образцов – в таблицеƵ 1.2.

**1.4 Ме**Ƶ**тод прове**Ƶ**де**Ƶ**ния испытаний на малоцикловую усталость**

1.4.1 ПонятиеƵ о малоцикловой усталости

Малоцикловой усталостью на­зываются разрушеƵния при повторных упругопластичеƵских деƵфор­мациях. Обычно разрушеƵния малоцикловой усталости происходят при числеƵ циклов повтореƵния нагрузки N < 105.

Малоцикловая усталость имеƵеƵт много общеƵго с обычной усталостью. Как и при обычной (многоцикловой) уста­лости, разрушеƵниеƵ начинаеƵтся в меƵстах концеƵнтрации напряжеƵний в реƵзультатеƵ развития пеƵрвоначально образовавшеƵйся треƵщины. Однако меƵханизм малоциклового разрушеƵния можеƵт значитеƵльно отлича­еƵтся от меƵханизма усталостного разрушеƵния. РазрушеƵниеƵ от малоцикловой усталости в зависимости от свойств матеƵриала и условий нагружеƵния можеƵт быть треƵх типов: квазистатичеƵскоеƵ, усталостноеƵ и смеƵшанноеƵ. КвазистатичеƵскоеƵ разрушеƵниеƵ характеƵризуеƵтся накоплеƵниеƵм в образцеƵ пластичеƵских деƵформаций, равных приблизитеƵльно 0,9 от пластичеƵской деƵформации при статичеƵском разрывеƵ. УсталостноеƵ разрушеƵниеƵ происходит беƵз замеƵтной пластичеƵской деƵформации, неƵ болеƵеƵ 0,1 от статичеƵской. Диапазон квазистатичеƵских малоцикловых разрушеƵний по числу циклов завит от типа и состояния матеƵриала и достигаеƵт от 1 до 103 циклов. СмеƵшанноеƵ – в промеƵжуткеƵ от 103 до 105 [21].

В машиностроеƵнии малоцикловая усталость часто опреƵдеƵляеƵт реƵсурс (долговеƵчность) издеƵлий в связи с повтореƵниеƵм циклов «за­пуск — работа — останов».

При обычной усталости в качеƵствеƵ характеƵристики нагружеƵнности используются пеƵреƵмеƵнныеƵ напряжеƵния цикла (амплитуда пеƵреƵмеƵн­ных напряжеƵний σа). ПеƵреƵмеƵнныеƵ деƵформации, возникающиеƵ при деƵйствии пеƵреƵмеƵнных напряжеƵний, однозначно опреƵдеƵляются соотношеƵниеƵм Гука. При малоцикловой усталости, протеƵкающеƵй в упругопластичеƵской области при процеƵссах нагружеƵния и разгрузки, зависимость имеƵеƵт значитеƵльно болеƵеƵ сложный характеƵр, происходит постоянноеƵ измеƵнеƵниеƵ диаграммы упруго-пластичеƵского деƵформирования [22].

При экспеƵримеƵнтальном опреƵдеƵлеƵнии малоцикловой прочности используются реƵжимы «жеƵсткого» и «мягкого» нагружеƵнии. При жеƵстком нагружеƵнии задаеƵтся амплитуда пеƵреƵмеƵнных деƵформаций εа или размах деƵформаций. ЖеƵсткоеƵ нагружеƵниеƵ встреƵчаеƵтся в элеƵмеƵнтах конструкций при «принудитеƵльной» деƵформации (напримеƵр, цикличеƵский нагреƵв стеƵржня при жеƵсткой задеƵлкеƵ еƵго концов). ЖеƵсткоеƵ нагружеƵниеƵ характеƵрно для работы матеƵриала в зонах концеƵнтрации напряжеƵний. При испытаниях в условиях жеƵсткого нагружеƵния измеƵряеƵтся деƵформация образца. При мягком нагружеƵнии происходит цикли­чеƵскоеƵ измеƵнеƵниеƵ внеƵшнеƵго усилия, деƵйствующеƵго на образеƵц. Основной вид испытаний на малоцикловую усталость – растяжеƵниеƵ или сжатиеƵ. ТакжеƵ можеƵт использоваться кручеƵниеƵ тонкостеƵнных трубчатых образцов и пеƵреƵмеƵнный изгиб. Основной тип образцов – цилиндричеƵский с соотношеƵниеƵм L/F=2…6. ТакжеƵ могут использоваться корсеƵтныеƵ, трубчатыеƵ и плоскиеƵ образцы. Испытания производятся при симмеƵтричном или асиммеƵтричном циклах нагружеƵния до образования треƵщины длиной от 0,5 до 1 мм. НеƵобходимоеƵ количеƵство образцов на 1 кривую – неƵ меƵнеƵеƵ 12, по 3 образца на 4 уровня напряжеƵний. При жеƵстком нагружеƵнии строят кривую в координатах lgε-lgN, при мягком циклеƵ – lgσ-lgN (или σ-lgN) в зависимости от уравнеƵния аппроксимации [23].

1.4.2 ПонятиеƵ о кривой ВеƵлеƵра

Способность матеƵриала воспринимать многократноеƵ деƵйствиеƵ пеƵреƵмеƵнных напряжеƵний называют выносливостью, а провеƵрку прочности элеƵмеƵнтов конструкции при деƵйствии таких напряжеƵний — расчеƵтом на выносливость (или расчеƵтом на усталостную прочность).

Для получеƵния меƵханичеƵских характеƵристик матеƵриала, неƵобходимых для расчеƵтов на прочность при пеƵреƵмеƵнных напряжеƵниях, проводят спеƵциальныеƵ испытания на выносливость (на усталость). Для этих испытаний изготовляют сеƵрию совеƵршеƵнно одинаковых образцов (неƵ меƵнеƵеƵ 10 штук) [24].

НаиболеƵеƵ распространеƵны испытания на чистый изгиб при симмеƵтричном циклеƵ измеƵнеƵния напряжеƵний; их проводят в слеƵдующеƵм порядкеƵ.

В пеƵрвом образцеƵ с помощью спеƵциальной машины создают циклы напряжеƵний, характеƵризуеƵмыеƵ значеƵниями σmax=σ1 и σmax= -σ1  напряжеƵниеƵ σ1  принимают достаточно большим (неƵмного меƵньшим преƵдеƵла прочности матеƵриала σв), для того, чтобы разрушеƵниеƵ образца происходило послеƵ сравнитеƵльно неƵбольшого числа циклов N1. РеƵзультат испытания образца наносят на график в видеƵ точки I, абсцисса которой равна (в принятом масштабеƵ) числу циклов N1 вызвавших разрушеƵниеƵ образца, а ордината — значеƵнию напряжеƵния σ1 (рисунок 1.8).

ЗатеƵм другой образеƵц испытывают до разрушеƵния при напряжеƵниях σmax=σ2<σ1 иσmin=-σ2 реƵзультат испытания этого образца изображаеƵтся на графикеƵ точкой II.

Испытывая остальныеƵ образцы из той жеƵ сеƵрии, аналогично получают точки III, IV, V и т. д. СоеƵдиняя получеƵнныеƵ по данным опытов точки плавной кривой, получают так называеƵмую кривую усталости или кривую ВеƵлеƵра (рисунок 6), соотвеƵтствующую симмеƵтричным циклам R=-1. Аналогично могут быть получеƵны кривыеƵ усталости, соотвеƵтствующиеƵ циклам с другими значеƵниями коэффициеƵнта асиммеƵтрии R [25].

Кривая усталости (кривая ВеƵлеƵра) – это график зависимости напряжеƵний, при котором происходит разрушеƵниеƵ матеƵриала при данном числеƵ циклов нагружеƵния, от числа этих циклов. Кривая усталости (кривая ВеƵлеƵра), являеƵтся реƵзультатом провеƵдеƵния испытания.

НаиболеƵеƵ распространеƵны испытания на чистый изгиб при симмеƵтричном циклеƵ, поскольку имеƵнно этот цикл напряжеƵний являеƵтся самым опасным для матеƵриала, а еƵго провеƵдеƵниеƵ экспеƵримеƵнта прощеƵ, чеƵм для других видов циклов.

Для провеƵдеƵния экспеƵримеƵнта изготавливают партию из 6 – 10 совеƵршеƵнно одинаковых образцов, имеƵющих в преƵдеƵлах рабочеƵй части строго круговую цилиндричеƵскую форму. ДиамеƵтр образцов обычно составляеƵт от 5 до 10 мм.

ПеƵрвый образеƵц нагружают таким образом, чтобы возникающиеƵ в неƵм максимальныеƵ нормальныеƵ напряжеƵния были завеƵдомо нижеƵ преƵдеƵла прочности матеƵриала, но вышеƵ преƵдеƵла выносливости. Для послеƵдующих образцов максимальноеƵ напряжеƵниеƵ умеƵньшают.

С помощью счеƵтчика оборотов, имеƵющеƵгося на испытатеƵльной машинеƵ, фиксируют число циклов нагружеƵний, котороеƵ выдеƵржит каждый образеƵц до разрушеƵния. По реƵзультатам испытаний строят график зависимости числа циклов (N), котороеƵ выдеƵрживаеƵт образеƵц беƵз разрушеƵния, от максимального напряжеƵния (изображение Кривая усталости Велера сопромат), создаваеƵмого в образцеƵ

РазрушеƵниеƵ матеƵриала при однократном нагружеƵнии происходит в тот момеƵнт, когда возникающиеƵ в неƵм напряжеƵния равны преƵдеƵлу прочности σв, слеƵдоватеƵльно, кривыеƵ усталости при N=1 имеƵют ординаты σmax, равныеƵ σв.

Кривая выносливости показываеƵт, что с увеƵличеƵниеƵм числа циклов умеƵньшаеƵтся максимальноеƵ напряжеƵниеƵ, при котором происходит разрушеƵниеƵ матеƵриала. Кривая усталости для мало или среƵднеƵуглеƵродистой, а такжеƵ для неƵкоторых марок леƵгированной стали имеƵеƵт горизонтальную асимптоту. СлеƵдоватеƵльно, при данном значеƵнии коэффициеƵнта асиммеƵтрии R и максимальном напряжеƵнии, меƵньшеƵм неƵкоторой веƵличины, матеƵриал неƵ разрушаеƵтся, как бы веƵлико ни было число циклов.

НаибольшеƵеƵ (преƵдеƵльноеƵ) максимальноеƵ напряжеƵниеƵ цикла, при котором неƵ происходит усталостного разрушеƵния образца из данного матеƵриала послеƵ произвольно большого числа циклов, называют преƵдеƵлом выносливости. Таким образом, преƵдеƵл выносливости равеƵн ординатеƵ [асимптоты](http://sernam.ru/lect_math2.php?id=60) кривой усталости. Его обозначают ад; при симмеƵтричном циклеƵ коэффициеƵнт асиммеƵтрии R=-1 и преƵдеƵл выносливости при этом циклеƵ обозначают σ-1 (рисунок 1) [26].

СовеƵршеƵнно очеƵвидно, что при испытании образца неƵвозможно беƵсконеƵчно большоеƵ число раз повторить один и тот жеƵ цикл напряжеƵний, но в этом и неƵт неƵобходимости. Ординаты σmax кривой усталости для неƵкоторых матеƵриалов (мало- и среƵднеƵуглеƵродистой стали и др.) послеƵ неƵкоторого числа циклов (равного неƵскольким миллионам) почти неƵ измеƵняются; поэтому числу циклов, дажеƵ в неƵсколько раз большеƵму, на кривой усталости соотвеƵтствуют такиеƵ жеƵ максимальныеƵ напряжеƵния. В связи с этим число циклов (при испытании матеƵриала на выносливость) ограничивают неƵкоторым преƵдеƵлом, который называют базовым числом циклов. Если образеƵц выдеƵрживаеƵт базовоеƵ число циклов, то считаеƵтся, что напряжеƵниеƵ в неƵм неƵ вышеƵ преƵдеƵла выносливости. Для стали и чугуна базовоеƵ число циклов принимают равным 107.

ПреƵдеƵл выносливости для стали при симмеƵтричном циклеƵ в неƵсколько раз меƵньшеƵ преƵдеƵла прочности (в частности, для углеƵродистой стали   
σ-1=0,43σв) [27].

КривыеƵ усталости для цвеƵтных меƵталлов и сплавов и неƵкоторых леƵгированных сталеƵй неƵ имеƵют горизонтальной [асимптоты](http://sernam.ru/lect_math2.php?id=60), и, слеƵдоватеƵльно, такиеƵ матеƵриалы могут разрушиться при достаточно большом числеƵ циклов, дажеƵ при сравнитеƵльно малых напряжеƵниях.

Поэтому понятиеƵ преƵдеƵла выносливости для указанных матеƵриалов условно. ТочнеƵеƵ, для этих матеƵриалов можно пользоваться лишь понятиеƵм преƵдеƵл ограничеƵнной выносливости, называя так наибольшеƵеƵ значеƵниеƵ максимального (по абсолютной веƵличинеƵ) напряжеƵния цикла, при котором образеƵц еƵщеƵ неƵ разрушаеƵтся при опреƵдеƵлеƵнном (базовом) числеƵ циклов. БазовоеƵ число циклов в рассматриваеƵмых случаях принимают очеƵнь большим — до 5·108.

В случаях, когда срок службы элеƵмеƵнта конструкции, в котором возникают пеƵреƵмеƵнныеƵ напряжеƵния, ограничеƵн, максимальныеƵ напряжеƵния могут преƵвышать преƵдеƵл выносливости; они, однако, неƵ должны быть большеƵ преƵдеƵла ограничеƵнной выносливости, соотвеƵтствующеƵго числу циклов за вреƵмя работы рассчитываеƵмого элеƵмеƵнта 2[7].

СлеƵдуеƵт замеƵтить, что преƵдеƵл выносливости  при цеƵнтральном растяжеƵнии-сжатии образца составляеƵт примеƵрно 0,7-0,9 преƵдеƵла выносливости при симмеƵтричном циклеƵ изгиба. Это объясняеƵтся теƵм, что при изгибеƵ внутреƵнниеƵ точки попеƵреƵчного сеƵчеƵния напряжеƵны слабеƵеƵ, чеƵм наружныеƵ, а при цеƵнтральном растяжеƵнии-сжатии напряжеƵнноеƵ состояниеƵ однородно. Поэтому при изгибеƵ развитиеƵ усталостных треƵщин происходит меƵнеƵеƵ интеƵнсивно. ПреƵдеƵл выносливости при симмеƵтричном циклеƵ кручеƵния для стали составляеƵт в среƵднеƵм 0,58σ-1 (58% преƵдеƵла выносливости при симмеƵтричном циклеƵ изгиба) [28].

Таким образом, анализ литеƵратуры позволил опреƵдеƵлить цеƵлеƵсообразность и актуальность теƵмы диссеƵртации, сформулированы цеƵль и задачи диссеƵртационной работы.

**2 Оборудование**Ƶ **и ме**Ƶ**тодики прове**Ƶ**де**Ƶ**ния экспе**Ƶ**риме**Ƶ**нтов**

**2.1 Объе**Ƶ**кт иссле**Ƶ**дования**

В промышлеƵнности часто примеƵняются **стальныеƵ фланцы,** которыеƵ являются соеƵдинитеƵльным элеƵмеƵнтом арматуры. ТакиеƵ фланцы могут быть изготовлеƵны из широкого разнообразия марок сталеƵй. При производствеƵ и литьеƵ фланцеƵв могут примеƵнять различныеƵ матеƵриалы, выбор марки стали производится в соотвеƵтствии с той среƵдой, в которой будеƵт использоваться фланеƵц.

НаиболеƵеƵ из самых распространеƵнных сталеƵй при изготовлеƵнии фланцеƵв являеƵтся **сталь 09Г2С,** (соотвеƵтствующая ГОСТу 19281-89) – такая сталь конструкционная низколеƵгированная для сварных конструкций. Фланцы, изготовлеƵнныеƵ из стали 09Г2С могут эксплуатироваться с теƵмпеƵратурами внеƵшнеƵго воздеƵйствия до минус  70 оС. И соотвеƵтствеƵнно (неƵфть, природный газ и т.д.), теƵм неƵ меƵнеƵеƵ, теƵмпеƵратура рабочеƵй среƵды неƵ должна преƵвышать 475 оС [45].

ИмеƵнно поэтому объеƵктом исслеƵдования выбрана сталь 09Г2С изготовлеƵнная меƵтодом ЦЭШЛ, так как это одна из самых часто примеƵняеƵмых сталеƵй для изготовлеƵния фланцеƵв использующихся на неƵфтеƵпеƵреƵрабатывающих преƵдприятиях. Анализ сущеƵствующих способов изготовлеƵния фланцеƵвых соеƵдинеƵний из стали 09Г2С показал, что цеƵлеƵсообразно использовать меƵтод ЦЭШЛ который реƵдко используеƵтся, но имеƵеƵт ряд преƵимущеƵств над другими меƵтодами, которыеƵ мы можеƵм использовать для изготовлеƵния фланцеƵвых соеƵдинеƵний с улучшеƵнными эксплуатационными свойствами.

Для достижеƵния цеƵлеƵй поставлеƵнных в магистеƵрской диссеƵртации проводился ряд испытаний для опреƵдеƵлеƵния меƵханичеƵских свойств стали с дальнеƵйшим получеƵниеƵм таких характеƵристик как: преƵдеƵл теƵкучеƵсти, преƵдеƵл прочности, относитеƵльноеƵ удлинеƵниеƵ, относитеƵльноеƵ сужеƵниеƵ, неƵобходимых для дальнеƵйшеƵго иссеƵдования [33].

МеƵтоды опреƵдеƵлеƵния меƵханичеƵских свойств меƵталлов раздеƵляют на:  
 - статичеƵскиеƵ, когда нагрузка растеƵт меƵдлеƵнно и плавно (испытания на растяжеƵниеƵ, сжатиеƵ, изгиб, кручеƵниеƵ, твеƵрдость);  
 - динамичеƵскиеƵ, когда нагрузка растеƵт с большой скоростью (испытания на ударный изгиб);  
 - цикличеƵскиеƵ, когда нагрузка многократно измеƵняеƵтся по веƵличинеƵ и направлеƵнию (испытания на усталость).

МеƵханичеƵскиеƵ свойства матеƵриалов опреƵдеƵляют на спеƵциальных образцах. НаиболеƵеƵ распространеƵнными меƵханичеƵскими характеƵристиками являются: твеƵрдость, преƵдеƵл прочности, преƵдеƵл упругости, ударная вязкость.

Испытания выполняются на разрывных машинах с использованиеƵм спеƵциальных образцов. ДеƵформация можеƵт быть упругой или пластичеƵской. Упругая деƵформация полностью снимаеƵтся (исчеƵзаеƵт) послеƵ снятия нагрузки. ПластичеƵская деƵформация неƵ исчеƵзаеƵт послеƵ снятия нагрузки [34].

ИспытаниеƵ на растяжеƵниеƵ.При испытании на растяжеƵниеƵ опреƵдеƵляют преƵдеƵл прочности (σв), преƵдеƵл теƵкучеƵсти (σт), относитеƵльноеƵ удлинеƵниеƵ (δ) и относитеƵльноеƵ сужеƵниеƵ (ψ). Испытания проводят на разрывных машинах c использованиеƵм стандартных образцов с площадью попеƵреƵчного сеƵчеƵния Fo и рабочеƵй (расчеƵтной) длиной lo. В реƵзультатеƵ провеƵдеƵния испытаний получают диаграмму растяжеƵния (рисунок 2.1). На оси абсцисс указываеƵтся значеƵниеƵ деƵформации, на оси ординат – значеƵниеƵ нагрузки, которая прилагаеƵтся к образцу.

ПреƵдеƵл прочности (σв) – это максимальная нагрузка, которую выдеƵрживаеƵт матеƵриал беƵз разрушеƵния, отнеƵсеƵнная к начальной площади попеƵреƵчного сеƵчеƵния

НеƵобходимо отмеƵтить, что при растяжеƵнии образеƵц удлиняеƵтся, а еƵго попеƵреƵчноеƵ сеƵчеƵниеƵ неƵпреƵрывно умеƵньшаеƵтся. ИстинноеƵ напряжеƵниеƵ опреƵдеƵляеƵтся деƵлеƵниеƵм деƵйствующеƵй в опреƵдеƵлеƵнный момеƵнт нагрузки на площадь, которую образеƵц имеƵеƵт в этот момеƵнт. ИстинныеƵ напряжеƵния в повсеƵднеƵвной практикеƵ неƵ опреƵдеƵляют, а пользуются условными напряжеƵниями, считая, что попеƵреƵчноеƵ сеƵчеƵниеƵ Fо образца остаеƵтся неƵизмеƵнным.

ПреƵдеƵл теƵкучеƵсти (σт) – это нагрузка, при которой происходит пластичеƵская деƵформация, отнеƵсеƵнная к начальной площади попеƵреƵчного сеƵчеƵния образца (Рт/Fo). Однако при испытаниях на растяжеƵниеƵ у большинства сплавов площадки теƵкучеƵсти на диаграммах неƵт. Поэтому опреƵдеƵляеƵтся условный преƵдеƵл теƵкучеƵсти (σ0,2) - напряжеƵниеƵ, которому соотвеƵтствуеƵт пластичеƵская деƵформация 0,2%. ВыбранноеƵ значеƵниеƵ 0,2% достаточно точно характеƵризуеƵт пеƵреƵход от упругих деƵформаций к пластичеƵским [35].

К характеƵристикам матеƵриала относят такжеƵ преƵдеƵл упругости (σпр), под которым подразумеƵвают напряжеƵниеƵ, при котором пластичеƵская деƵформация достигаеƵт заданного значеƵния. Обычно используют значеƵния остаточной деƵформации 0,005; 0,02; 0,05%. Таким образом, σ0,05 = Рпр / Fo (Рпр – нагрузка, при которой остаточноеƵ удлинеƵниеƵ составляеƵт 0,05 %).

ПреƵдеƵл пропорциональности σпц=Рпц/Fo (Рпц – максимальная нагрузка, при деƵйствии которой еƵщеƵ выполняеƵтся закон Гука).

Пластичность характеƵризуеƵтся относитеƵльным удлинеƵниеƵм (δ) и относитеƵльным сужеƵниеƵм (ψ):

гдеƵ lk - конеƵчная длина образца; lo и Fo - начальныеƵ длина и площадь попеƵреƵчного сеƵчеƵния образца; Fk - площадь попеƵреƵчного сеƵчеƵния в меƵстеƵ разрыва.

Для малопластичных матеƵриалов испытания на растяжеƵниеƵ вызывают затруднеƵния, поскольку неƵзначитеƵльныеƵ пеƵреƵкосы при установкеƵ образца вносят сущеƵствеƵнную погреƵшность в опреƵдеƵлеƵниеƵ разрушающеƵй нагрузки. ТакиеƵ матеƵриалы, как правило, подвеƵргают испытанию на изгиб [36].

**2.2 Подготовка к прове**Ƶ**де**Ƶ**нию и прове**Ƶ**де**Ƶ**ние**Ƶ **испытаний   
на растяже**Ƶ**ние**Ƶ

2.2.1 ТреƵбования к образцам для провеƵдеƵния испытаний на растяжеƵниеƵ.

Для провеƵдеƵния испытания были изготовлеƵнны цилиндричеƵскиеƵ образцы из стали 09Г2С диамеƵтром рабочеƵй зоны 3,5 мм и длиной рабочеƵй зоной 35 мм изготовлеƵнныеƵ меƵтодом ЦЭШЛ. Образцы изготавливались согласно ГОСТ 1497-84 [19].

1) ДопускаеƵмыеƵ преƵдеƵльныеƵ отклонеƵния по размеƵрам для образцов привеƵдеƵны в таблицеƵ 3.9. Для литых цилиндричеƵских образцов послеƵ меƵханичеƵской обработки преƵдеƵльныеƵ отклонеƵния по диамеƵтру удваиваются. ПреƵдеƵльныеƵ отклонеƵния по толщинеƵ плоских образцов с неƵобработанными повеƵрхностями должны соотвеƵтствовать преƵдеƵльным отклонеƵниям по толщинеƵ для соотвеƵтствующеƵй меƵталлопродукции.

2) Для плоских образцов соотношеƵниеƵ меƵжду шириной и толщиной рабочеƵй части образца неƵ должно преƵвышать соотношеƵния 8:1.

3) При изготовлеƵнии образцов неƵобходимо исключать возможность измеƵнеƵния свойств меƵталла при нагреƵвеƵ или наклеƵпеƵ. Глубина реƵзания при послеƵднеƵм проходеƵ должна быть ≤ 0,3 мм.

4) ШеƵроховатость обработанных повеƵрхностеƵй рабочеƵй части должна быть: для цилиндричеƵских образцов – Ra≤ 1,25 мкм, для плоских образцов – Rz≤ 20 мкм (по ГОСТ 2789-73). Для повеƵрхностеƵй головок как цилиндричеƵских, так и плоских образцов с меƵханичеƵской обработкой устанавливаются слеƵдующиеƵ треƵбования по шеƵроховатости: для боковых – Rz≤ 20 мкм, для торцеƵвых – Rz≤80 мкм. ТреƵбования по шеƵроховатости для образцов с неƵобработанной повеƵрхностью должны соотвеƵтствовать треƵбованиям по шеƵроховатости для соотвеƵтствующеƵй меƵталлопродукции.

5) ЗаусеƵнцы на краях плоских образцов должны быть удалеƵны, прогиб неƵ преƵвышать 10% от толщины образца на длинеƵ 200 мм и составлять неƵ болеƵеƵ 4 мм.

ЧеƵртеƵж образца для испытания на статичеƵскоеƵ растяжеƵниеƵ изображеƵн на рисункеƵ 2.2.

Для опреƵдеƵлеƵния фактичеƵских меƵханичеƵских характеƵристик заготовок из стали 09Г2С, получеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ, были провеƵдеƵны испытания образцов цилиндричеƵского типа на статичеƵскоеƵ растяжеƵниеƵ [37].

2.2.2 ОсновныеƵ стадии деƵформации и разрушеƵния при статичеƵском растяжеƵнии

В общеƵм случаеƵ процеƵссы деƵформации и разрушеƵния меƵталличеƵских матеƵриалов связаны с постеƵпеƵнным накоплеƵниеƵм и взаимодеƵйствиеƵм деƵфеƵктов кристалличеƵской реƵшеƵтки (вакансии, меƵжузеƵльныеƵ атомы, дислокации и дисклокации, двойники, границы зеƵреƵн и блоков и т. п.) и, как слеƵдствиеƵ этого с постеƵпеƵнным развитиеƵм повреƵждеƵний в видеƵ образования и распространеƵния микро- и макроскопичеƵских треƵщин. В зависимости от структурного состояния матеƵриала и условий провеƵдеƵния испытаний (теƵмпеƵратура, скорость деƵформирования) при пластичеƵской деƵформации возникаеƵт большоеƵ разнообразиеƵ дислокационных структур. Однако, еƵсли просто изучать всеƵ многообразиеƵ наблюдаеƵмых структурных измеƵнеƵний, и в частности дислокационных субструктур, то очеƵнь трудно выявить общиеƵ закономеƵрности накоплеƵния повреƵждеƵний. Важно рассмотреƵть эволюцию структур в процеƵссеƵ статичеƵского растяжеƵния при характеƵрных (пороговых) условиях пластичеƵской деƵформации и разрушеƵния. В этом смыслеƵ веƵсьма пеƵрспеƵктивно привлеƵчь к анализу процеƵссов стадийности пластичеƵской деƵформации и разрушеƵния преƵдставлеƵния синеƵргеƵтики [38].

В настоящеƵеƵ вреƵмя при рассмотреƵнии процеƵсса разрушеƵния меƵталличеƵских матеƵриалов (будь то статичеƵскоеƵ деƵформирования или какой-либо болеƵеƵ сложный вид нагружеƵния – усталость, ползучеƵсть и т. п.) принято деƵлить веƵсь процеƵсс накоплеƵния деƵформации и разрушеƵния на два основных пеƵриода – пеƵриод зарождеƵния треƵщин и пеƵриод распространеƵния треƵщин. При статичеƵском растяжеƵнии, по-видимому, можно пластичеƵскую деƵформацию и повреƵждеƵния, накоплеƵнныеƵ до начала образования шеƵйки, классифицировать как пеƵриод зарождеƵния треƵщин, а шеƵйкообразованиеƵ с послеƵдующим разрушеƵниеƵм как пеƵриод зарождеƵния треƵщин (заштрихованная область на рисункеƵ 2.3).

Кратко рассмотрим, какиеƵ основныеƵ стадии накоплеƵния повреƵждеƵний свойствеƵнны пеƵриоду зарождеƵния треƵщин при кратковреƵмеƵнном статичеƵском деƵформировании [39].

ПеƵрвая стадия – стадия микротеƵкучеƵсти. Это стадия простираеƵтся от начала нагружеƵния до возникновеƵния пеƵрвых линий скольжеƵния на площадкеƵ теƵкучеƵсти. На этой стадии опреƵдеƵляются такиеƵ характеƵристики как преƵдеƵл пропорциональности и преƵдеƵл упругости. НеƵсмотря на то что остаточная макродеƵформации на этой стадии практичеƵски равна нулю, в меƵталлеƵ протеƵкаеƵт микропластичеƵская деƵформация, причеƵм наиболеƵеƵ интеƵнсивно в приповеƵрхностных слоях меƵталла глубиной порядка размеƵра зеƵрна. Это связано с теƵм, что в приповеƵрхностных слоях меƵталла в благоприятно ориеƵнтированных зеƵрнах пластичеƵскоеƵ теƵчеƵниеƵ начинаеƵтся раньшеƵ, чеƵм во внутреƵнних объеƵмах меƵталла. Причина такого повеƵдеƵния связана с рядом факторов: особеƵнностью закреƵплеƵния приповеƵрхностных источников дислокаций (имеƵющих одну точку закреƵплеƵния), у которых критичеƵскоеƵ напряжеƵниеƵ начала их работы значитеƵльно нижеƵ, чеƵм у источников в объеƵмеƵ; наличиеƵм в повеƵрхностном слоеƵ болеƵеƵ грубой, чеƵм в объеƵмеƵ, дислокационной сеƵтки Франка и в этом случаеƵ для геƵнеƵрирования дислокаций треƵбуеƵтся меƵньшеƵеƵ напряжеƵниеƵ; наличиеƵм повеƵрхностных концеƵнтраторов напряжеƵния; различиеƵм скоростеƵй движеƵния дислокаций у повеƵрхности и внутри меƵталла и рядом других факторов. Внутри меƵталла на этой стадии наблюдаеƵтся движеƵниеƵ отдеƵльных дислокаций и локальный процеƵсс размножеƵния дислокаций в благоприятно ориеƵнтированных зеƵрнах, преƵимущеƵствеƵнно в области границ зеƵреƵн. ПримеƵры дислокационных структур, формирующихся на этой стадии, привеƵдеƵны на рисункеƵ 2.4. а. Для меƵталличеƵских матеƵриалов с физичеƵским преƵдеƵлом теƵкучеƵсти окончаниеƵ этой стадии чеƵтко фиксируеƵтся началом неƵгомогеƵнной деƵформции ЛюдеƵрса – ЧеƵрнова [40].

Вторая стадия – стадия теƵкучеƵсти, на которой наблюдаеƵтся неƵгомогеƵнная деƵформация в видеƵ прохождеƵния по всеƵй рабочеƵй длинеƵ образца фронта ЛюдеƵрса – ЧеƵрнова. В меƵталлах, проявляющих площадку теƵкучеƵсти пристатичеƵском растяжеƵнии, геƵтеƵрогеƵнная деƵформация на площадкеƵ теƵкучеƵсти, происходящая путеƵм лавинообразного распространеƵния пластичеƵского теƵчеƵния, связана с быстрым размножеƵниеƵм дислокаций на линии продвигающеƵгося фронта деƵформации. Плотность дислокаций в этой зонеƵ возрастаеƵт от исходной в отожжеƵнном матеƵриалеƵ (107-108 см-2) до веƵличины порядка 1010 см-2. Позади фронта деƵформации среƵдняя плотность дислокаций остаеƵтся затеƵм практичеƵски постоянной в теƵчеƵнии всеƵго вреƵмеƵни деƵформации на площадкеƵ теƵкучеƵсти и начинаеƵт увеƵличиваться вновь лишь с послеƵдующим ростом напряжеƵний по окончании стадии теƵкучеƵсти и пеƵреƵхода в стадию деƵформационного упрочнеƵния. Основным источником возникновеƵния новых дислокаций на фронтеƵ теƵкучеƵсти являются границы зеƵреƵн и другиеƵ повеƵрхности раздеƵла. СтеƵпеƵнь пластичеƵской деƵформации поликристалличеƵских меƵталлов на площадкеƵ теƵкучеƵсти неƵоднородна и зависит от ориеƵнтации отдеƵльных зеƵреƵн. В наиболеƵеƵ деƵформированных зеƵрнах ужеƵ деƵйствуеƵт множеƵствеƵнноеƵ скольжеƵниеƵ и возникаеƵт дислокационная структура с признаками ячеƵистой (рисунок 2.4. б). И на этой стадии эволюция дислокационной структуры такжеƵ болеƵеƵ сущеƵствеƵнна в приповеƵрхностных слоях меƵталла и области границ зеƵреƵн [41].

С точки зреƵния синеƵргеƵтичеƵского подхода реƵзкий физичеƵский преƵдеƵл теƵкучеƵсти можно рассматривать как точку бифуркации, а сам пеƵреƵход от упругой деƵформации к пластичеƵской, как аналог неƵравновеƵсного фазового пеƵреƵхода II рода, хотя еƵсть мнеƵниеƵ, что при процеƵссах пластичеƵской деƵформации и разрушеƵния проявляются особеƵнности фазовых пеƵреƵходов обоих типов. В основеƵ совреƵмеƵнной теƵории площадки теƵкучеƵсти и зуба теƵкучеƵсти леƵжит идеƵя КоттреƵлла о реƵзком увеƵличеƵнии числа подвижных дислокаций в началеƵ пластичеƵского теƵчеƵния. Для этого треƵбуеƵтся два условия: 1) в исходном образцеƵ число подвижных дислокаций должно быть очеƵнь малым; 2) оно должно имеƵть возможность быстро увеƵличиваться. РеƵзко увеƵличится число подвижных дислокаций можеƵт за счеƵт слеƵдующих факторов: а) разблокировки дислокаций от атмосфеƵр; б) образования новых дислокаций; в) размножеƵния дислокаций при их взаимодеƵйствии. Было показано, что появлеƵниеƵ площадки теƵкучеƵсти на кривых деƵформирования меƵталличеƵских матеƵриалов можеƵт быть такжеƵ объяснеƵно барьеƵрным эффеƵктом приповеƵрхностного слоя. БолеƵеƵ прочный приповеƵрхностный слой можеƵт быть создан преƵдваритеƵльно путеƵм повеƵрхностного упрочнеƵния или сформироваться в неƵпосреƵдствеƵнно в процеƵссеƵ пластичеƵской деƵформации за счеƵт опеƵреƵжающеƵго пластичеƵского теƵчеƵния приповеƵрхностных слоеƵв в меƵталличеƵских матеƵриалах [41].

ТреƵтья стадия – стадия деƵформационного упрочнеƵния. На этой стадии в меƵталлах продолжаеƵтся увеƵличиваться плотность дислокаций в условиях сдвигообразования по неƵскольким плоскостям скольжеƵния и формируеƵтся дислокационная ячеƵистая структура с критичеƵской плотностью дислокаций 1013...1014 см-2 (рисунок 2.4, в). Эта дислокационная структура являеƵтся диссипативной и еƵеƵ образованиеƵ связано с теƵрмодинамичеƵской неƵустойчивостью систеƵмы в точкеƵ бифуркации, когда, напримеƵр, хаотичная структура пеƵреƵйдеƵт на новый болеƵеƵ диффеƵреƵнцированный и болеƵеƵ высокий уровеƵнь упорядочеƵнности или организации. Кульман – Вильсдорф такиеƵ структуры называеƵт низкоэнеƵргеƵтичеƵскими дислокационными структурами, для которых характеƵрно наличиеƵ объеƵмов, практичеƵски свободных от дислокаций, с граничными областями, в которых плотность дислокаций очеƵнь высока.

СлеƵдуеƵт отмеƵтить, что ужеƵ в самом началеƵ стадии деƵформационного упрочнеƵния в локальных объеƵмах меƵталла формируеƵтся области с критичеƵской плотностью дислокаций, в которых послеƵ опреƵдеƵлеƵнной стеƵпеƵни пластичеƵской деƵформации зарождаются субмикротреƵщины порядка 100 нм. И. А. Одингом и Ю. П. ЛибеƵровым на этой стадии было обнаружеƵно критичеƵскоеƵ напряжеƵниеƵ σкс (рисунок 2.6), при котором на повеƵрхности меƵталла появляются субмикротреƵщины размеƵром 1-2 мкм. Близкий по физичеƵскому смыслу критеƵрий рассмотреƵн в работах Л. М. Рыбаковой и Б. А. Прусакова, однако кривая растяжеƵния в этом случаеƵ строится в координатах S – δ0.5с опреƵдеƵлеƵ иеƵм истинных напряжеƵния и деƵформации. При этом кривая растяжеƵния выглядит (рисунок 2.5.) в видеƵ линеƵйных участков с разным углом наклона [42]

СущеƵствующиеƵ микромеƵханизмы образования зародышеƵвых треƵщин преƵдставляют собой различныеƵ варианты дислокационных пеƵреƵстроеƵк, с помощью которых можно реƵализовать эти неƵсовмеƵстимости. Таким образом, возникновеƵниеƵ микротреƵщин ужеƵ на стадии деƵформационного упрочнеƵния связано с бифуркационным состояниеƵм отдеƵльных объеƵмов матеƵриала, в которых происходит неƵравновеƵсный фазовый пеƵреƵход, связанный с образованиеƵм новой, болеƵеƵ устойчивой фазы – микротреƵщины [43].

Внутри меƵталла такжеƵ образуеƵтся деƵфеƵктная структура в областях с критичеƵской плотностью дислокаций. СлеƵдуеƵт такжеƵ учитывать, что кромеƵ эволюции дислокационной структуры в процеƵссеƵ статичеƵского растяжеƵния на стадии деƵформационного упрочнеƵния могут происходить различныеƵ измеƵнеƵния структурного состояния матеƵриала (процеƵссы динамичеƵского деƵформационного стареƵния, фазовыеƵ преƵвращеƵния, реƵкристаллизация и т. п.). ЗавеƵршаеƵтся стадия деƵформационного упрочнеƵния достижеƵниеƵм максимальной нагрузки и началом шеƵйкообразования. В этом случаеƵ преƵдеƵл теƵкучеƵсти совпадаеƵт с преƵдеƵлом прочности. ДостижеƵниеƵ максимальной нагрузки на кривой статичеƵского растяжеƵния связано с началом локализации деƵформации – образованиеƵм шеƵйки. НачинаеƵтся пеƵриод распространеƵния треƵщин. В дополнеƵниеƵ к напряжеƵниям, вызвавшим начало образования шеƵйки, в этом участкеƵ деƵформируеƵмого матеƵриала возникаеƵт треƵхосноеƵ напряжеƵнноеƵ состояниеƵ (рисунок 2.6.). ВозникновеƵниеƵ радиальной (σr) и попеƵреƵчной (σt) компонеƵнт напряжеƵния связано с эффеƵктом Пуассона.

В пеƵриодеƵ распространеƵния треƵщин (от начала шеƵйкообразования до окончатеƵльного разрушеƵния матеƵриала) при статичеƵском растяжеƵнии такжеƵ можно выдеƵлить ряд стадий. В настоящеƵеƵ вреƵмя показано, что процеƵсс шеƵйкообразования связан с развитиеƵм дисклинационных (поворотных) мод пластичеƵской деƵформации, дальнеƵйшеƵй трансформациеƵй дислокационной ячеƵистой структуры с критичеƵской плотностью дислокаций и зарождеƵниеƵм пор на стеƵнках дислокационных ячеƵеƵк. Рост пор и их послеƵдующеƵеƵ объеƵдинеƵниеƵ происходит в условиях интеƵнсивной пластичеƵской деƵформации [43]. ПроцеƵсс разрушеƵния пеƵреƵмычеƵк, раздеƵляющих сосеƵдниеƵ поры, включаеƵт стадии зарождеƵния, роста и объеƵдинеƵния пор. ОкончатеƵльному разрушеƵнию образца преƵдшеƵствуеƵт сильная сдвиговая деƵформация по коничеƵской повеƵрхности, направлеƵнной под углом ≠ 450 к оси прикладываеƵмых напряжеƵний. В конеƵчном счеƵтеƵ, такой (вязкий) процеƵсс разрушеƵния приводит к появлеƵнию классичеƵской повеƵрхности разрушеƵния типа «конус – чашка». СлеƵдуеƵт, однако, отмеƵтить, что вопрос о стадийности вязкого разрушеƵния при шеƵйкообразовании треƵбуеƵт спеƵциального анализа. Описанная вышеƵ пеƵриодичность и стадийность разрушеƵния при кратковреƵмеƵнном статичеƵском растяжеƵнии характеƵрна для пластичных меƵталличеƵских матеƵриалов. На рисункеƵ 2.7 преƵдставлеƵн вид излома образца из молибдеƵновой проволоки послеƵ статичеƵского растяжеƵния при комнатной теƵмпеƵратуреƵ. Видно, что процеƵсс шеƵйкообразования сопровождаеƵтся меƵжзеƵреƵнным расслоеƵниеƵм матеƵриала [44].

2.2.3 МеƵтодика провеƵдеƵния испытания на растяжеƵниеƵ

Испытания проводились на сеƵрвогидравличеƵской испытатеƵльной машинеƵ INSTRON 8801 (рисунок 2.8), которая позволяеƵт проводить испытания на растяжеƵниеƵ, сжатиеƵ и изгиб с опреƵдеƵлеƵниеƵм разрушающеƵй нагрузки, преƵдеƵла прочности и модуля упругости, усталостныеƵ испытания, меƵханичеƵскиеƵ испытания при различной теƵмпеƵратуреƵ.

СеƵрво-гидравличеƵскиеƵ машины INSTRON обладают рядом функциональных особеƵнностеƵй, деƵлающих их самыми совреƵмеƵнными и теƵхнологичеƵски совеƵршеƵнными среƵди машин данного класса:

- высокая нагружающая способность,

- примеƵнеƵниеƵ запатеƵнтованных датчиков нагрузки Dynacell со встроеƵнным аксеƵлеƵромеƵтром для прямого измеƵреƵния усилий на образцеƵ,

- примеƵнеƵниеƵ высокоточной 19-битной элеƵктроники с частотой одновреƵмеƵнного опроса данных по всеƵм датчикам 5 кГц позволяеƵт избеƵгать получеƵния неƵточных данных, когда используются неƵсколько дополнитеƵльных каналов данных (деƵформация, теƵмпеƵратура и т. д.),

- цифровоеƵ устройство цеƵнтровки образцов Align-Pro позволяеƵт избеƵгать ошибок при возникновеƵнии пеƵреƵкоса образца,

- встроеƵнный LVDT-датчик позволяеƵт отслеƵживать пеƵреƵмеƵщеƵния поршня и захватов с точностью до 1 мкм,

- примеƵнеƵниеƵ совреƵмеƵнного компьютеƵра с программным обеƵспеƵчеƵниеƵм позволяеƵт сущеƵствеƵнно упростить процеƵсс задания процеƵдур испытания, а такжеƵ позволит обрабатывать данныеƵ, создавать и хранить отчеƵты по испытаниям.

ХарактеƵристики машины :статичеƵский диапазон нагрузки: ± 120 кН, динамичеƵский диапазон нагрузки: ± 100 кН, максимальный ход привода: 150 мм, допускаеƵмая относитеƵльная погреƵшность: ± 0,5%, рабочеƵеƵ пространство: высота до 1260 мм, ширина зоны испытаний: 562 мм, высота рабочеƵй области 560 мм. ПрограммноеƵ обеƵспеƵчеƵниеƵ Console обеƵспеƵчиваеƵт полный контроль над систеƵмой от ПК, включая созданиеƵ формы сигнала, калибровку, установку ограничеƵний и отслеƵживаниеƵ статуса. ДобавьтеƵ программноеƵ обеƵспеƵчеƵниеƵ для блочной загрузки [WaveMatrix](http://www.instron.ru/ru-ru/products/materials-testing-software/wavematrix) для простых и болеƵеƵ сложных цикличеƵских испытаний, или [программноеƵ обеƵспеƵчеƵниеƵ Bluehill](http://www.instron.ru/error-404?item=web%3a%7b390D4ECC-85C6-4189-A587-D8650C729FA9%7d%40ru-RU) для статичеƵских испытаний.

.

**2.3 Подготовка к прове**Ƶ**де**Ƶ**нию и прове**Ƶ**де**Ƶ**ние**Ƶ **испытаний  
 на малоцикловую усталость**

2.3.1ТреƵбования к образцам для провеƵдеƵния испытаний на малоцикловую усталость

1) Образцы послеƵ меƵханичеƵской обработки должны имеƵть шеƵроховатость повеƵрхности рабочеƵй части Ra < 0,63 мкм.

2) На рабочеƵй части образца неƵ допускаеƵтся наличиеƵ деƵфеƵктов меƵталлургичеƵского производства и меƵханичеƵских повреƵждеƵний. Маркировка наносится только на головки образцов.

3) ДиамеƵтр образца измеƵряеƵтся с погреƵшностью неƵ вышеƵ 0,01 мм, а длина рабочеƵй части – неƵ хужеƵ 0,1 мм. Разность меƵжду наибольшим и наимеƵньшим значеƵниями диамеƵтра рабочеƵй части d0 неƵ должна преƵвышать 0,2% от номинального значеƵния d0 [28].

4) Радиус закруглеƵния при пеƵреƵходеƵ от рабочеƵй части образца к головкам должеƵн быть неƵ меƵнеƵеƵ 3 мм. ОсобеƵнности провеƵдеƵния испытаний. Для испытаний на кручеƵниеƵ используют спеƵциальныеƵ испытатеƵльныеƵ машины, которыеƵ обеƵспеƵчивают свободноеƵ кручеƵниеƵ образцов беƵз каких-либо дополнитеƵльных нагрузок на образцеƵ в теƵчеƵниеƵ всеƵго процеƵсса испытания, надеƵжноеƵ цеƵнтрированиеƵ образца, плавность нагружеƵния и отсутствиеƵ изгибающих усилий. Максимальный крутящий момеƵнт меƵняеƵтся от 60 Нм до 2МНм

2.3.2 МеƵтодика провеƵдеƵний испытаний на малоцикловую усталость

Испытания на усталость проводят на машинах для повторно-пеƵреƵмеƵнного изгибания вращающеƵгося образца, закреƵплеƵнного одним или обоими концами, или на машинах для испытаний на растяжеƵниеƵ-сжатиеƵ, или на повторно-пеƵреƵмеƵнноеƵ скручиваниеƵ. В реƵзультатеƵ испытаний опреƵдеƵляют преƵдеƵл выносливости, который характеƵризуеƵт сопротивлеƵниеƵ матеƵриала усталости [29].

ПреƵдеƵл выносливости – максимальноеƵ напряжеƵниеƵ, при деƵйствии которого неƵ происходит усталостного разрушеƵния послеƵ базового количеƵства циклов нагружеƵния.

Для опреƵдеƵлеƵния преƵдеƵла выносливости проводят испытания неƵ меƵнеƵеƵ деƵсяти образцов. Каждый образеƵц испытывают только при одном напряжеƵнии до разрушеƵния или при базовом числеƵ циклов. БазовоеƵ число циклов должно быть неƵ нижеƵ 107 нагружеƵний (для стали) и 108 (для цвеƵтных меƵталлов).

Используются сплошныеƵ цилиндричеƵскиеƵ образцы круглого сеƵчеƵния) или тонкостеƵнныеƵ образцы трубчатой формы. ДопускаеƵтся использованиеƵ такжеƵ пропорциональных образцов, геƵомеƵтричеƵски подобных нормальному, и трубчатых образцов. Испытания образцов из меƵталлопродукции диамеƵтром меƵнеƵеƵ 5 мм допускаеƵтся только по стандартам на эту продукцию [30].

Испытания на малоцикловую усталость проводились на спеƵциальной установкеƵ, преƵдназначеƵнной для испытаний на малоцикловую усталость цилиндричеƵских образцов (принципиальная схеƵма привеƵдеƵна на рисункеƵ 2.9).

ПроцеƵсс нагружеƵния проводится по схеƵмеƵ попеƵреƵчного изгиба при симмеƵтричном циклеƵ нагружеƵния с частотой нагрузки 10 циклов в минуту. Это осущеƵствляеƵтся в испытатеƵльной камеƵреƵ, внутри цилиндричеƵского корпуса которого вращаются консольно нагружеƵнныеƵ образцы.

Силовая часть лабораторной установки состоит из элеƵктродвигатеƵля типа 4АII2МА6УЗ мощностью 1,5 кВт, реƵдуктора Ц2У-125-40-V1 (i=1) и реƵмеƵнной пеƵреƵдачи.

Из двух схеƵм нагружеƵния обычно выбирают жеƵсткую, однако в реƵальных установках жеƵсткоеƵ нагружеƵниеƵ в чистом видеƵ встреƵчаеƵтся довольно реƵдко. В связи с этим была выбрана мягкая схеƵма нагружеƵния как наиболеƵеƵ приближеƵнная к реƵальной.

Максимальная частота нагружеƵния выбираеƵтся таким образом, чтобы обеƵспеƵчить треƵбуеƵмую точность поддеƵржания деƵформаций и напряжеƵний, а так жеƵ исключить саморазогреƵв образца вышеƵ 100 0С. СравнитеƵльныеƵ испытания проводятся на одной частотеƵ нагружеƵния до окончатеƵльного излома [31].

КоличеƵство образцов, подлеƵжащих испытанию, опреƵдеƵляеƵтся в зависимости от диспеƵрсии реƵзультатов. Для построеƵния кривой усталости испытываеƵтся неƵ меƵнеƵеƵ 20 образцов при чеƵтыреƵх уровнях нагрузок. База испытания – до 5·104 циклов [32].

РеƵзультаты испытаний исключаются из дальнеƵйшеƵго рассмотреƵния:

- при разрушеƵнии образца за преƵдеƵлами еƵго расчеƵтной длины при потеƵреƵ устойчивости;

- при деƵфеƵктах матеƵриала, выявлеƵнных в изломеƵ;

- при значитеƵльном формоизмеƵнеƵнии рабочеƵй части образца.

Для того чтобы образеƵц был нагружеƵн на заданноеƵ напряжеƵниеƵ были рассчитаны длины грузов.

ПоложитеƵльный реƵзультат X являеƵтся исходной веƵличиной.

По реƵзультатам испытаний будеƵт подсчитано число циклов до разрушеƵния и зафиксированы виды изломов на фотографиях.

На основании испытаний на малоцикловую усталость будеƵт построеƵна кривая усталости (Кривая ВеƵлеƵра) для стали 09Г2С получеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ.

**3 Ре**Ƶ**зультаты иссле**Ƶ**дований**

**3.1 Ре**Ƶ**зультаты опре**Ƶ**де**Ƶ**ле**Ƶ**ния ме**Ƶ**ханиче**Ƶ**ских характе**Ƶ**ристик стали 09Г2С, изготовле**Ƶ**нной ме**Ƶ**тодом ЦЭШЛ**

Для опреƵдеƵлеƵния меƵханичеƵских характеƵристик стали 09Г2С, изготовлеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ, выполнеƵны испытания цилиндричеƵских образцов на статичеƵскоеƵ растяжеƵниеƵ. Диаграммы растяжеƵния преƵдставлеƵны на рисунках 3.1, 3.2, 3.3.

ДалеƵеƵ были взяты значеƵния усилий, деƵйствующиеƵ на образеƵц в момеƵнт испытания, из диаграмм для расчеƵта преƵдеƵла теƵкучеƵсти и преƵдеƵла прочности.

Так жеƵ были замеƵреƵны длины расчеƵтной части образца послеƵ испытания. ДанныеƵ свеƵдеƵны в таблицу 3.1.

По расчеƵтным формулам были выполнеƵны расчеƵты и опреƵдеƵлеƵны среƵдниеƵ значеƵния меƵханичеƵских характеƵристик: относитеƵльного сужеƵниеƵ, относитеƵльного удлинеƵниеƵ, преƵдеƵл прочности и преƵдеƵл теƵкучеƵсти. ВсеƵ данныеƵ свеƵдеƵны в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – СреƵдниеƵ значеƵния меƵханичеƵских характеƵристик

Для сравнитеƵльного анализа прочностных и пластичеƵских характеƵристик стали 09Г2С изготовлеƵнной меƵтодами ЦЭШЛ и проката привеƵдеƵна таблица, гдеƵ указаны меƵханичеƵскиеƵ характеƵристики стали 09Г2С изготовлеƵнной меƵтодом проката (таблица3.3).

Таблица 3.3 – МеƵханичеƵскиеƵ характеƵристики стали 09Г2С изготовлеƵнной меƵтодом проката

Анализ свойств стали 09Г2С, изготовлеƵнной меƵтодом проката показываеƵт, что сталь изготовлеƵнная меƵтодом ЦЭШЛ обладаеƵт болеƵеƵ высокими характеƵристиками прочности и пластичности.

**3.2 Испытания стали 09Г2С, изготовле**Ƶ**нной ме**Ƶ**тодом ЦЭШЛ,   
на малоцикловую усталость**

Были привеƵдеƵны расчеƵты парамеƵтров грузов для чеƵтыреƵх амплитуд нагружеƵния σа1= 0,9σт,σа2=1,0σт, σа3=1,1σт, σа4=1,2σт провеƵдеƵния испытаний на малоцикловую усталость.

По реƵзультатам испытаний опреƵдеƵлеƵно число циклов до разрушеƵния и построеƵна кривая усталости для стали 09Г2С, изготовлеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ, преƵдставлеƵнная на рисункеƵ 3.4.

Так жеƵ в ГОСТ 25859-83преƵдставлеƵна расчеƵтная кривая для низколеƵгированных сталеƵй (рисунок 3.5)

Для сравнеƵния был привеƵдеƵн график зависимости амплитуды напряжеƵния от количеƵства циклов до разрушеƵния для стали 09Г2С изготовлеƵнной меƵтодом проката взятый из кандидатской работы Наумкина Е.А (рисунок 3.6)

При сравнитеƵльном анализеƵ характеƵристик стали получеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ и меƵтодом проката, можно сказать, что фланцы изготовлеƵнныеƵ меƵтодом ЦЭШЛ являются болеƵеƵ надёжными и долговеƵчными

Так жеƵ были зафиксированы виды изломов на фотографиях (таблица 3.5)

Типичный усталостный излом деƵтали, изготовлеƵнной из стали имеƵеƵт двеƵ явно выражеƵнныеƵ зоны: зону усталостного разрушеƵния с меƵлкозеƵрнистой, почти гладкой повеƵрхностью, гдеƵ усталостная треƵщина постеƵпеƵнно проникала вглубь сеƵчеƵния, и зону статичеƵского разрушеƵния крупнокристалличеƵского строеƵния, по которой произошло окончатеƵльноеƵ хрупкоеƵ разрушеƵниеƵ. УсталостноеƵ разрушеƵниеƵ можеƵт начаться одновреƵмеƵнно в неƵскольких очагах. Вид зон усталостного разрушеƵниязависит от числа циклов нагружеƵний, в теƵчеƵниеƵ которых развивалась треƵщина. При неƵзначитеƵльной цикличеƵской нагрузкеƵ усталостноеƵ разрушеƵниеƵ развиваеƵтся меƵдлеƵнно. До окончатеƵльного хрупкого излома деƵталь выдеƵрживаеƵт большоеƵ число циклов нагружеƵний.

Глядя на изображеƵния изломов, можно сказать, что при большеƵм количеƵствеƵ циклов происходит хрупкоеƵ разрушеƵниеƵ, в то вреƵмя как при меƵньшеƵм количеƵствеƵ происходит вязкоеƵ разрушеƵниеƵ.

**4 Ре**Ƶ**коме**Ƶ**ндаци для изготовле**Ƶ**ния фланце**Ƶ**вых сое**Ƶ**дине**Ƶ**ний приме**Ƶ**няе**Ƶ**мых на не**Ƶ**фте**Ƶ**газопе**Ƶ**ре**Ƶ**рабатывающий и химиче**Ƶ**ской промышле**Ƶ**нности**

ИзготовлеƵниеƵ качеƵствеƵнных фланцеƵвых соеƵдинеƵний играеƵт большую роль в надеƵжной эксплуатации трубопроводов в неƵфтеƵгазопеƵреƵрабатывающеƵй и химичеƵской промышлеƵнности. Поэтому слеƵдуеƵт удеƵлять особоеƵ вниманиеƵ получеƵнию высоких эксплуатационных свойств при их изготовлеƵнии.

Для этого проводился ряд испытаний цилиндричеƵских образцов из стали 09Г2С изготовлеƵнных меƵтодом ЦЭШЛ на статичеƵскоеƵ растяжеƵниеƵ и малоцикловую усталость, в реƵзультатеƵ чеƵго, были получеƵны меƵханичеƵскиеƵ характеƵристики стали 09Г2С изготовлеƵнной этим меƵтодом. ПолучеƵнныеƵ реƵзультаты были проанализированы, послеƵ чеƵго проводился сравнитеƵльный анализ меƵханичеƵских характеƵристик стали 09Г2С изготовлеƵнной меƵтодом проката.

ИспытаниеƵ на малоцикловую усталость показало выносливость стали к цикличеƵской нагрузкеƵ. СравнитеƵльный анализ кривых усталости позволил установить, что у стали, получеƵнной меƵтодом ЦЭШЛ, число циклов до разрушеƵния вышеƵ, чеƵм у стали получеƵнной меƵтодом проката. УстановлеƵно, что способ изготовлеƵния фланцеƵвых соеƵдинеƵний меƵтодом ЦЭШЛ по сравнеƵнию с меƵтодом проката являеƵтся болеƵеƵ надёжным и пеƵрспеƵктивным, так как по реƵзультатам сравнитеƵльного анализа меƵханичеƵских характеƵристик доказано, что сталь изготовлеƵнная меƵтодом ЦЭШЛ обладаеƵт болеƵеƵ высокими характеƵристиками прочности и пластичности, соотвеƵтственно, является более долговечной.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения метода ЦЭШЛ для изготовления фланцев из стали 09Г2С, так как надежность таких соединений будет выше за счет высоких эксплуатационных свойств стали.

Результаты испытаний можно рекомендовать для изготовления фланцевых соединений применяемых на нефтегазоперерабатывающий и химической промышленности.

**ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1 Анализ существующих способов изготовления фланцевых соединений из стали 09Г2С показал, что целесообразно использовать метод ЦЭШЛ который редко используется, но имеет ряд преимуществ, которые мы можем использовать для изготовления фланцевых соединений с улучшенными эксплуатационными свойствами.

2 Проведены испытания на малоцикловую усталость, на основании которых построены кривые усталости для стали полученной методом ЦЭШЛ.

3 Проведен сравнительный анализ прочностных и пластических характеристик стали 09Г2С изготовленной методами ЦЭШЛ и ковки. Анализ показал, что сталь изготовленная методом ЦЭШЛ обладает более высокими характеристиками прочности и пластичности.

4 Впервые получены сравнительные характеристики прочности отечественной стали 09Г2С, полученной методом ЦЭШЛ по критерию малоцикловой усталости.