

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт машиностроения

Кафедра Нанотехнологии, материаловедение и механика

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Повышение работоспособности и коррозионностойкости запорной арматуры
нефтетрубопроводов на основе использования стали 13ХФА

Направление подготовки 22.04.01

Материаловедение и технологии материалов

Магистерская программа - Материаловедение и технологии наноматериалов
и покрытий

Студент _____ Лапиков С.О.

(подпись, дата)

Научный руководитель д.ф-м.н., профессор _____ Выбойщик М.А.

(ученая степень, звание) (подпись, дата)

Руководитель программы д.т.н., профессор _____ Клевцов Г.В.

(ученая степень, звание) (подпись, дата)

Заведующий кафедрой к.ф-м.н., доцент _____ Прасолов С.Г.

(ученая степень, звание) (подпись, дата)

Аннотация

Пояснительная записка содержит 71 страницу, в том числе 28 рисунков, 20 таблиц, 73 источника, одно приложение.

В диссертации приведены цели и задачи работы, показана актуальность темы и сформулирована научная новизна.

Первый раздел посвящен аналитическому обзору литературных источников по теме диссертации. В частности, рассмотрены конструкционные особенности запорной арматуры, требования, предъявляемые к материалам для запорной арматуры, а также научные исследования тех свойств стали 13ХФА, которые могут рассматриваться в контексте применения этой стали для задвижек клиновых, работающих при транспортировке первичных нефтедобываемых сред.

Во втором разделе приведены испытания запорной арматуры из стали 09Г2С и стали 13ХФА, проведенные на ООО «Самарский ИТЦ» и подробно описана методика приведенных исследований.

В третьем разделе обсуждаются результаты испытаний. На основе механических и технологических свойств исследуемого материала сформулированы основные выводы проведенной работы.

Содержание

Введение.....	4
1 Аналитический обзор.....	7
1.1 Сведения о запорной арматуре	7
1.1.1 Основные типы запорной арматуры из стали	8
1.2 Задвижки клиновые.....	9
1.2.1 Условия работы задвижек	17
1.2.2 Выбор материала задвижки	18
1.3 Сталь 13ХФА. Свойства и особенности применения	20
1.4 Выводы.....	34
2. Комплексное исследование стали 13ХФА	35
2.1 Испытания на образцах материала задвижки	35
2.2 Определение химического состава	39
2.3 Результаты исследования неметаллических включений и структуры ..	41
2.4 Механические испытания.....	47
2.5 Результаты испытаний в агрессивных средах.....	50
2.6 Выводы.....	58
3. Обсуждение результатов	60
3.1 Сравнение показателей 09Г2С и 13ХФА.....	60
3.2 Выводы.....	62
Заключение	63
Список использованной литературы.....	64
Приложение А	71

Введение

Разнообразие материалов, используемых для изготовления трубопроводной арматуры, очень велико. Но, как и прежде, сталь остается одним из наиболее востребованных материалов, используемых для производства приспособлений, позволяющих перекрывать (регулировать) любой поток в трубе, а также обеспечивать необходимую герметичность. Самый простой пример применения стали для запорной арматуры, знакомый каждому с детства, – кран на кухонном смесителе. По трубопроводам транспортируют нефть и газ, холодную и горячую воду, пар, самотеком или с помощью насосов. В любом случае незаменимыми являются стали для запорной арматуры: углеродистая, легированная, нержавеющая [1].

Сталь является наиболее качественным материалом для производства запорной арматуры, так как имеет высокую механическую прочность и пластичность, которая способствует выравниванию напряжений внутри детали, не позволяя ей разрушаться. Это важно для арматуры, применяемой в трубопроводах высокого давления и температуры.

Надежность работы запорной арматуры – один из важнейших показателей работы нефтегазопроводов, а также других транспортировочных систем, применяющихся в химической и нефтехимической отраслях. Качество и работоспособность материалов являются основными факторами, характеризующими безаварийную работу систем. Поэтому крайне важным является изучение возможности использования материалов с более высокими прочностными и коррозионными характеристиками, на замену ныне используемых.

Актуальность данной работы определена частыми отказами трубных систем, обусловленных повреждением запорной арматуры. Основные причины выхода из строя – является низкая коррозионная стойкость и низкие прочностные характеристики.

Исходя из этого, *целью данной работы* является повышение надежности и коррозионной стойкости запорной арматуры.

Указанная цель может быть достигнута при решении *следующих задач*:

- Провести механические и коррозионные испытания стали 13ХФА
- Провести сравнительный анализ механических и коррозионных свойств применяемой в настоящее время для изготовления запорной арматуры стали 09Г2С с13ХФА
- Оценить целесообразность изготовления запорной арматуры из стали 13ХФА

Объектом исследования является малоуглеродистая низколегированная сталь 13ХФА, широко используемая в качестве конструкционного материала в химической и нефтехимической промышленности, например, в изготовлении нефте- и газопроводных труб. Данная сталь обладает хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств и высокими коррозионными свойствами, особенно в условиях присутствия H_2S , что важно для запорной арматуры, используемой для транспортировки нефтесодержащей среды высокой агрессивности. Однако, для принятия решения об использовании данной стали в качестве материала задвижек клиновых необходимо комплексное ее исследование на соответствие требованиям, предъявляемым к запорной арматуре, работающей в условиях нефтесодержащих сред. Соответственно, эти механические и коррозионные свойства традиционных и новых являются *предметом* исследования.

Научная новизна:

- Показано, что высокая работоспособность запорной аппаратуры может быть обеспечена на тех же принципах, что и разработка специальных трубных сталей для аналогичных условий эксплуатации.
- Установлено, что стали с малым легированием хромом и ванадием значительно повышают механические свойства и сероводородную стойкость запорной аппаратуры.

Теоретическая значимость:

Наиболее рациональным решением при выборе базовой стали для изготовления запорной аппаратуры, работающей в крайне жестких условиях эксплуатации, является использование специальных трубных сталей, разработанных для этих условий эксплуатации.

Практическая значимость:

- Показано, что сталь 13ХФА при близкой технологичности с используемой сталью 09Г2С, обладает более высокой прочностью и коррозионной стойкостью.
- Разработаны новые ТУ (вместо ТУ 3741-001-22986183-2009) на изготовление запорной аппаратуры из стали 13ХФА для нефтегазопроводных систем.

1 Аналитический обзор

Требования к запорной арматуре и свойства стали 13ХФА

Темой аналитического обзора является рассмотрение методик и подходов для изготовления запорной арматуры. Данный обзор содержит сведения о требованиях, предъявляемых к материалам для запорной арматуры, а также характеристиках стали 13ХФА.

1.1 Сведения о запорной арматуре

Как уже говорилось выше, наиболее качественным материалом для производства запорной арматуры является сталь. Это обусловлено прежде всего ее механическими характеристиками, а также доступностью и распространенностью. ГОСТ 4666-75 регламентирует специальную окраску корпуса детали, которая свидетельствует о том, из какого материала она сделана. Так, чугунные детали окрашивают черным цветом, из углеродистой стали - серым, из нержавеющей - голубым, из легированной - синим.

К запорной арматуре относятся задвижки, заслонки и краны, а также вентили и затворы. Запорная арматура должна качественно функционировать в условиях необходимого рабочего давления и температуры (учитывая их перепады), быть устойчивой к физическим и химическим особенностям пропускаемой среды в различных климатических поясах. Например, большая скорость и значительные смены давления, вызывают ускоренную эрозию деталей, чтобы ее предупредить, применяют аустенитные стали, имеющие повышенную износостойкость. В некоторых случаях нужны твердые сплавы.

1.1.1 Основные типы запорной арматуры из стали

Задвижки стальные преимущественно используют там, где запирающий элемент должен работать в связке «открыто-зарыто». По типу задвижки можно разделить на клиновые и параллельные, по способу производства:

- штампованные;
- цельнолитые;
- сварные.

На трубопроводах, по которым перекачивают нейтральные жидкие и газообразные среды, ставят *задвижки клиновые штампованные*, корпуса которых сварены из листовой углеродистой или коррозионностойкой стали. В трубопроводах, по которым перекачивают жидкости с температурой до +80°C (природный или сжиженный газ, газообразные среды), а также для горячей воды, пара и некоторых нефтепродуктов (t до +565°C) применяют задвижки клиновые нержавеющие.

Хорошая герметичность достигается при применении жестких клиновых задвижек, но поскольку клин цельнолитой, то при значительных температурных колебаниях их может заклинивать из-за термического расширения сплава, поэтому рациональнее применять двухдисковые задвижки.

Задвижки параллельные бывают однодисковыми (шибер) и двухдисковыми, с распорным элементом. Литые задвижки отличаются повышенной надежностью.

Наиболее популярный тип арматуры – кран, который открывает или закрывает поток при помощи вращательных движений. Он может применяться на трубопроводах с любыми средами нормальной температуры, быть изготовлен как из стали, так и из других материалов.

Вентиль предназначается для действий по полному перекрытию или пуску рабочего потока, а запирающий элемент расположен в нем параллельно оси потока. Ставят на трубах, условный диаметр которых не более 300 мм, рабочее давление - 2500 кг/см², а температура потока находится в границах от –200 до +450°C.

Вентиль из стали можно применять как запорную арматуру в трубопроводах, предназначенных для транспортировки жидких и газообразных сред, аммиака, других коррозирующих составов. Он выдерживает эксплуатацию в агрессивных средах, при высоких температурных режимах, значительном давлении. Корпус чаще выполнен из нержавеющей стали, для увеличения износостойкости рекомендуется применение легированных сталей. В обслуживании такой вентиль прост, как и в эксплуатации.

Затворы поворотные дисковые (так называемые *заслонки*) все чаще стали применять вместо традиционных задвижек, поскольку они более надежны, герметичны и удобны в использовании, годятся для использования в любых рабочих условиях (высокие температуры, давление, агрессивные среды). При их производстве используются различные марки стали, в том числе нержавейка и легированные, а также сплавы. Нашли свое применение в химической, текстильной промышленности, производстве минудобрений и перерабатывающих заводах.

1.2 Задвижки клиновые

Клиновые задвижки (рисунок 1.1) с точки зрения обеспечения герметичности затвора представляют собой самый сложный тип запорной арматуры. Задвижки клиновые являются четырех поверхностными системами, это значит, что для обеспечения герметичности в них изготавливаются четыре поверхности, расположенные с максимальной точностью относительно друг друга. Точность угловых параметров затвора является самой большой технологической проблемой задвижек клиновых. Для достижения точности в технологическом процессе ремонта должны использоваться или специализированная технологическая оснастка на универсальное оборудование, или специализированное ремонтное оборудование. Технологические приемы должны обеспечивать качество всей совокупности метрических параметров [1].

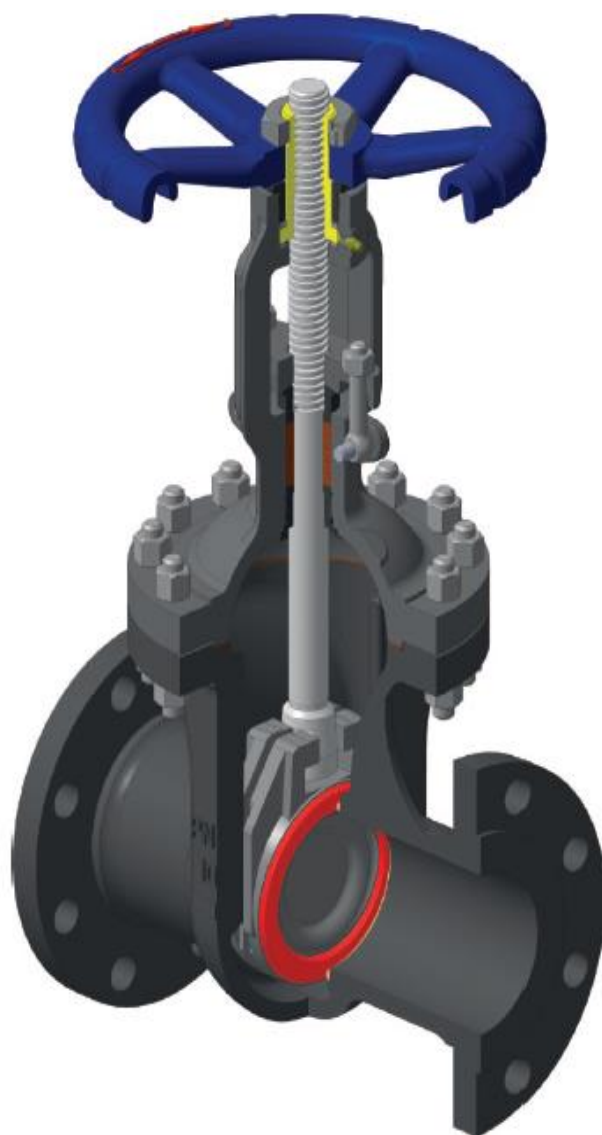


Рисунок 1.1 – Задвижка клиновая

По совокупности эксплуатационных свойств, характеризующих использование по назначению, задвижки относятся к классу запорной арматуры. Они предназначены для полного, в отдельных случаях и частичного, перекрытия (запирания) потоков газообразных, жидких, пульпообразных и сыпучих материалов, транспортируемых по трубопроводам. Функциональной особенностью задвижек, отличающих их от других типов запорной арматуры, является динамика работы запорного органа при перекрытии транспортируемого потока. У задвижек запирание осуществляется при поступательном перемещении запорного органа перпендикулярно направлению движения транспортируемого потока. Эта особенность обусловила одно из важ-

нейших достоинств задвижек перед другими типами запорной арматуры - низкий коэффициент гидравлического сопротивления (L) проточной части. Для различных конструктивных исполнений задвижек гидравлическое сопротивление колеблется в диапазоне $L=0,08...0,2$, что значительно ниже, чем у других типов запорной арматуры (кроме шаровых кранов). У запорной арматуры клапанного типа $L=2,0...5,0$ и более [1].

Задвижки получили широкое распространение и применяются успешно в трубопроводных системах с диаметром условного прохода DN от 15 мм до DN 2000 мм и условным давлением PN от глубокого вакуума до сотен атмосфер избыточного давления [2,3,5].

Задвижки изготавливаются как полнопроходными, так и суженными. У полнопроходных диаметры внутренних отверстий присоединительных патрубков (DN) соответствуют диаметру проходного отверстия проточной части корпуса (D) задвижки, то есть $D/DN=1$. У суженных задвижек диаметр проходного отверстия проточной части корпуса меньше внутренних патрубков, при этом соотношение $D/DN < 1$. Это приводит к возрастанию гидравлического сопротивления и, следовательно, к ухудшению эксплуатационных свойств задвижек [1].

В зависимости от характера встраивания задвижек в трубопроводную систему они изготавливаются или фланцевыми, или бесфланцевыми. Фланцевые устанавливаются на трубопровод и крепятся с соответствующими фланцами труб с помощью болтов, шпилек и гаек. Бесфланцевые задвижки соединяются с трубопроводом с помощью сварки, образуя сварное соединение [1].

Возможность использования задвижек в эксплуатационной системе во многом *зависит от материала*, из которого изготовлены корпусные детали. Материал определяет прочностные, коррозионные, износные и другие свойства задвижек. В настоящее время задвижки изготавливают из чугуна, стали, цветных материалов, различных сплавов, плакированные химически и износостойкими материалами.

Имеющиеся в настоящее время классификации промышленной трубо-

проводной арматуры, в том числе и задвижек, разработаны на основе использования совокупности функциональных, конструктивных, технологических классификационных признаков без четко выраженной связи с эксплуатационными характеристиками. Это затрудняет восприятие арматуры как элемента крупной эксплуатационной системы, выполняющего определенные функции и имеющего совокупность свойств, обеспечивающих её использование по назначению. На рисунке 1.2 представлена классификация задвижек, в которой конструктивные признаки формируют эксплуатационные свойства арматуры [1].

В представленной классификации конструктивные исполнения порождают внешние характеристики задвижек и раскрывают следующие из них эксплуатационные свойства, выражаемые через классификационные признаки.

- Первый классификационный признак дает качественное представление о гидравлическом сопротивлении проточной части задвижки;
- второй классификационный признак позволяет качественно оценить характер монтажа задвижки в трубопроводной системе;
- третий - характеризует условия использования задвижек, связанные с параметрическими свойствами транспортируемых по трубопроводу сред (химическую активность, температуру, давление и т.д.);
- четвертый классификационный признак дает возможность качественной оценки таких свойств задвижек, как прочность, гидравлическая плотность (внешняя герметичность), вес, долговечность, коррозионную стойкость и т.д.);
- пятый классификационный признак свидетельствует об уровне автоматизации управления работой задвижек;
- шестой классификационный признак дает представление о габаритных размерах и долговечности механизма управления и перемещения затвора;
- седьмой классификационный признак качественно характеризует усло-

вия обеспечения базового показателя качества - герметичности затвора, его ресурс и уровень универсальности использования в зависимости от параметрического состояния транспортируемых сред.

Клиновой затвор наиболее универсален по применению для различных сред, имеющих высокие давление, температуру, химическую активность и т.д. Параллельный затвор используется более ограниченно и в основном для небольших давлений, шланговый ограничен в применении и используется для загрязненных сред в ограниченном диапазоне температур [1].

Вся эта совокупность классификационных признаков, взаимосвязанная и выраженная в виде классификации уже на первом этапе анализа, позволяет сделать необходимые акценты при выборе арматуры и последующем ее техническом обслуживании, и ремонте.

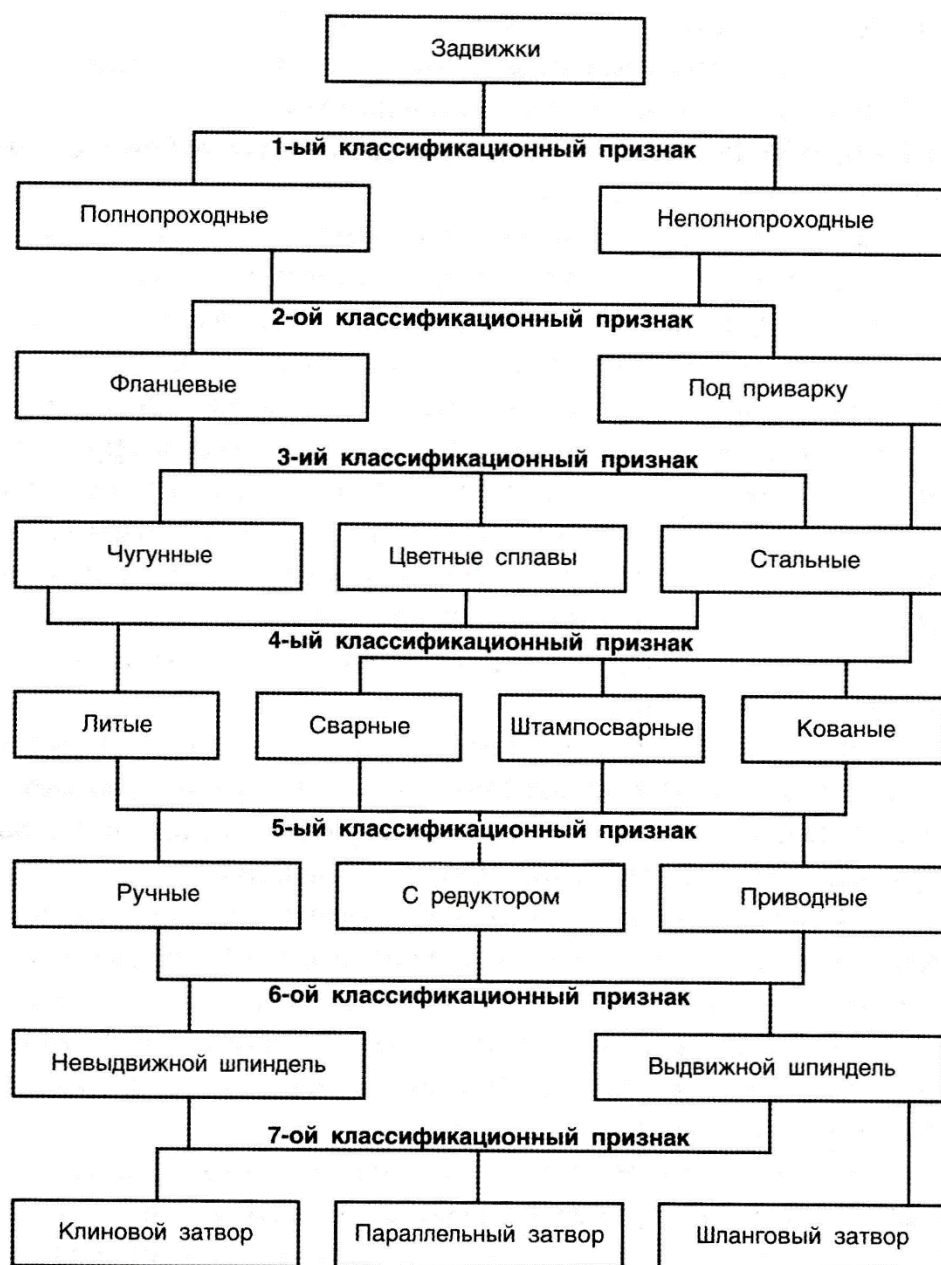


Рисунок 1.2 – Классификация трубопроводной арматуры [1]

Несмотря на стремление обеспечить работу затвора в режиме отсутствия самоторможения, на практике, в условиях эксплуатации, коэффициент трения больше, поэтому клиновые задвижки работают при самотормозящемся клине. **Одним из главных достоинств клиновых задвижек является меньшее по сравнению с параллельными задвижками усилие управления затвором при обеспечении его герметичности. Это эксплуатационное**

свойство порождает уменьшение мощности приводных устройств, с одной стороны и значительные **технологические проблемы получения высоко-точного клинового соединения**, с другой [1]. Эти технологические сложности побудили разработчиков арматуры вести работу по созданию клиновых задвижек различных конструкций, обладающих меньшими проблемами при подгонке клиновой пары «корпус - запорный орган». Как результат этой работы на рисунке 1.3 представлена классификация клиновых задвижек, в основу которой положены классификационные признаки, характеризующие способность конструкции расширить технологические возможности производителей при изготовлении клинового затвора и потребителей для последующего его технического обслуживания, и ремонта. Эти технологические возможности связаны, в первую очередь, с обеспечением точности угловых размеров клиновой камеры корпуса и запорного органа (клина) [8].

В представленной классификации первый классификационный признак дает первичную качественную оценку клинового затвора по его способности к нейтрализации вредного влияния угловых погрешностей элементов клинового соединения, образованных в процессе их изготовления, на принято упругим) клина и упругого самоустанавливающегося двухдискового клина [1].

Второй классификационный признак дает информацию о характере конструкторских решений упругого элемента клинового соединения, за счет которого может осуществляться нейтрализация вредного влияния угловых погрешностей элементов клинового соединения на работоспособность затвора.

Третий классификационный признак показывает, что нейтрализация вредного влияния угловых погрешностей клинового соединения может быть осуществлена за счет упругих свойств материала уплотнения. Следует обратить внимание, что **упругие свойства резино-полимерных материалов компенсируют также и другие погрешности поверхностей уплотнений (неплоскостность, некруглость, огранку, волнистость, а в некоторых случаях и шероховатость)**. Только следует иметь в виду, что резинополи-

мерные материалы могут компенсировать погрешности поверхностей уплотнений определенного количественного уровня.

Четвертый классификационный признак объединяет конструктивные исполнения уплотнений клинового соединения затворов, не обладающих какими-либо свойствами нейтрализации вредного влияния угловых погрешностей элементов клинового соединения.

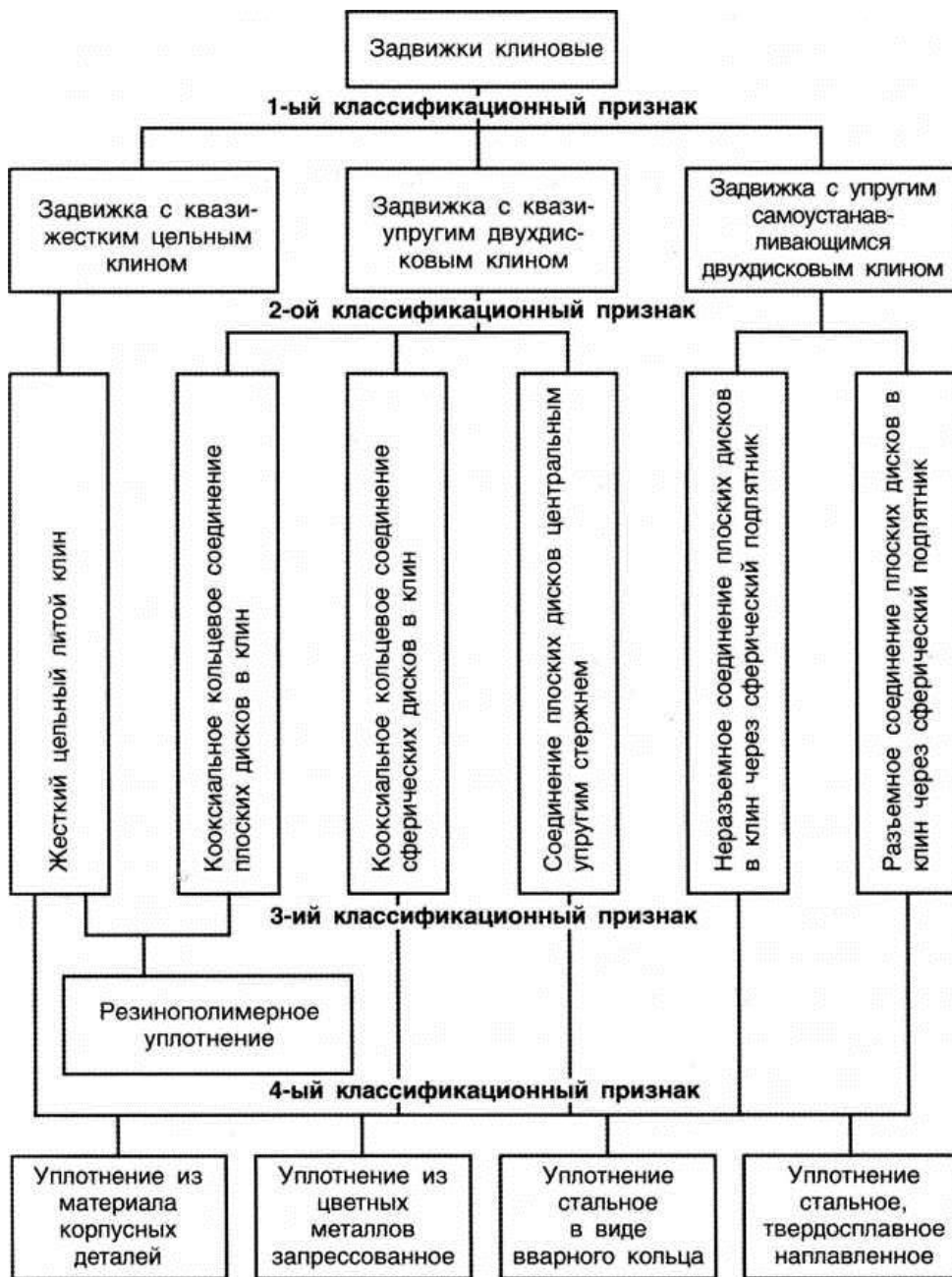


Рисунок 1.3 - Классификация клиновых задвижек по конструктивно-технологическим свойствам достижения точности соединения затвора [1]

1.2.1 Условия работы задвижек

Условия работы арматуры определяются большим числом факторов: рабочим давлением среды, рабочей температурой, физическими и химическими свойствами рабочей среды, колебаниями давления и температуры, периодичностью выполнения циклов срабатывания или переключений, типом привода, местонахождением на открытом месте или в закрытом помещении, климатическими условиями и др. **При высоких давлениях рабочей среды имеют большие значения усилия и моменты, необходимые для управления арматурой, усложняются условия для обеспечения герметичности запорного органа арматуры, сальникового узла и прокладочных соединений.** Большие скорости рабочей среды в седле, вызванные значительными перепадами давлений и проявляющимися особенно в момент открытия затвора, создают эрозионный износ затвора и уплотнительных колец [4,5,8].

Колебания давления и температуры создают условия для разуплотнения фланцевых соединений. Периодическое повышение температуры вызывает пластическую деформацию прокладки в связи с временным увеличением затяга болтов и шпилек. При снижении температуры затяг прокладки оказывается недостаточным и прокладочное соединение теряет герметичность. Колебания давления и температуры оказывают специфическое влияние и на свойства стали, вызывают старение, снижение пластичности, механических свойств и цикловой прочности.

Рабочие давления равны условным для арматуры из углеродистой стали при рабочей температуре среды от 0 до 200°C, для арматуры из чугуна, бронзы и латуни - при рабочей температуре среды от 0 до 120°C. При повышении рабочей температуры допускаемое рабочее давление снижают в зависимости от материала корпусных деталей арматуры. В ГОСТ 356-80 предусмотрены температурные ступени, в пределах которых рабочее давление по мере повышения температуры снижается.

Использование задвижек, как, впрочем, и других типов запорной арматуры, обуславливается совокупной оценкой многочисленных условий, кото-

рые должны быть обеспечены, исходя из свойств задвижек.

1.2.2 Выбор материала задвижки

Запорная арматура и задвижки в частности имеют чрезвычайно широкое применение практически во всех отраслях промышленности, где используются трубопроводы и трубопроводная транспортировка материалов. Учитывая, что по трубопроводам транспортируются вода, холодная и горячая, пар, насыщенный и перегретый, химические материалы в виде продуктов, полупродуктов или отходов, жидкие металлы и расплавы солей, газы различного агрегатного состояния, пульпообразные смеси, сыпучие материалы и т.д. выбору материалов для деталей арматуры придается чрезвычайно большое значение. От правильности выбора зависят в первую очередь безопасность эксплуатации технологических установок, прочностные характеристики задвижек, ресурс деталей и всего изделия.

Для задвижек по характеру использования материалов можно выделить следующие группы деталей:

1. Корпус, крышка, клин.
2. Уплотнительные кольца и наплавочные материалы для них.
3. Диски, крестовины, шпиндели, штоки, плунжеры.
4. Ходовые гайки, поднабивочные втулки.
5. Пружины.
6. Крепежные детали.
7. Прокладки.
8. Сальниковые набивки.

Для этих групп деталей материалы выбираются с учетом энергетических параметров транспортируемых сред, их химической и механической активности. В таблицах 1.1 и 1.2 приведены рекомендации [1] к выбору материалов для деталей задвижек в нефте- и газопроводах.

Таблица 1.1 – Материалы для задвижек газопроводов

Основные марки применяемых материалов	Параметры среды		
	Состояние газа	температура, °С	
		от	до
СЧ 18-36	Газообразный	-15	+200
КЧЗО-6, ВСтЗсп, ВСтЗпс, ВСт5сп, ВСт5пс		-30	+200
20, 35, 25Л, 20Х13		-40	+200
20ХНЗА, 09Г2С, 10Г2, 14Х17Н2	Жидкий	-70	-
10Х14Г14Н4Т		-100	-
12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 10Х18Н9ТЛ		-164	-
ЛС59-1 Л, ЛС59-1, ЛК80-ЗЛ, ЛЖМЦ59-1-1, БрАЖМц 10-3-1Д	Газообразный и жидкий	-164	+200

Задвижки используются там, где габариты арматуры не имеют решающего значения, а условия эксплуатации тяжелые: высокая температура рабочей среды, требуется длительная герметичность затвора. Задвижки имеют малое гидравлическое сопротивление, малую строительную длину (при малых давлениях), низкую стоимость и широкий диапазон диаметров прохода. Задвижки используются только в качестве запорной арматуры. При необходимости частого открывания и закрывания (высокая частота циклов) применять их не рекомендуется.

Таблица 1.2 – Материалы деталей задвижек газо- и нефтепроводов [1]

Детали	Материалы
Корпуса, крышки, клинья	10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 10X18H12M3TЛ, БрОцЮ-2, БрОц8-4, БрАЖНМц9-4-4-1, ВТ1-0, СЧ18-36, КЧ30-6
Шпиндели, штоки, плунжеры, золотники	10X17H13M2T, 10X17H13M3T, БрОЦЮ-2, БрОЦ8-4, БрАЖНМц9-4-4-1, ВТ1-0, ОТ-4, БрАЖМц 10-3-1,5
Уплотнительные кольца	В арматуре из бронзы - материал корпуса. В арматуре из титана - наплавка окисленным титаном, оксидированный титан. В арматуре из чугуна - бронза.
Пружины	БрОЦ4-3, БрБ2, БрКМц3-1
Ходовые гайки, поднабивочные втулки в арматуре из чугуна	ЛС59-1, Л-62, ЛМцС58-2-2, БрАЖМц 10-3-1,5

1.3 Сталь 13ХФА. Свойства и особенности применения

Сталь 13ХФА была разработана в 2006 году [16] в результате сотрудничества ООО «Самарский инженерно-технический центр» и ОАО «Северсталь». Наиболее полное исследование свойств стали 13ХФА и результатов ее эксплуатации проведено авторами разработки стали 13ХФА Тетюевой Т.В. и Иоффе А.В. совместно с сотрудниками и учениками [17-20]. Обращает на себя внимание, также проведенный сравнительный анализ сталей 20, 09Г2С и

13ХФА, выполненный в работах Платонова С.Ю. и Выбойщика Л.М. [21-23].

Трубная низколегированная сталь **13ХФА** (таблица 1.3) – является одной из наиболее успешных из разработанных в последнее время.

Таблица 1.3 – Химический состав в % материала 13ХФА

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Al	Cu
0.11 - 0.17	0.17 - 0.37	0.4 - 0.65	до 0.25	до 0.015	до 0.015	0.5 - 0.7	0.04 - 0.09	до 0.008	0.02 - 0.05	до 0.25

В основном, **сталь** марки 13ХФА применяется для изготовления сварных бесшовных горячедеформированных нефтегазопроводных труб, которые предназначены для использования в системах транспортирующих газ, системах нефтегазопроводов, технологических промысловых трубопроводов, транспортирующих нефть и нефтепродукты, а также в системах поддержания пластового давления в условиях северной климатической зоны при температуре окружающей среды от -60°C до +40°C, температурой транспортируемых сред от +5°C до +40°C и рабочим давлением до 7,4 МПа; бесшовных горячедеформированных труб повышенной коррозионной стойкости и хладостойкости, с наружным диаметром от 89 до 426 мм класса прочности не менее K52, для внутрипромысловых трубопроводов, транспортирующих продукцию нефтяных скважин (газопроводов и напорных нефтепроводов при давлении до 4,6 МПа). Трубы из стали 13ХФА отличаются повышенной стойкостью к коррозии, хладостойкостью, особо высокой надежностью и прочностью, стойкостью к сульфидному растрескиванию, образованию водородных трещин, невосприимчивостью к различным внешним воздействиям. Сталь 13ХФА имеет ряд свойств, делающей ее хорошим материалом для изготовления запорно-регулирующей арматуры.

1. Механические свойства. Сталь 13ХФА обладает сравнительно неплохими механическими характеристиками. В работе Иоффе [10] рассмотрены ее характеристики относительно других сталей, применяющихся в качестве материала для нефтепроводов и других элементов системы транспортировки и хранения нефти, в т.ч. и в условиях севера (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Механические свойства стали 13ХФА [10]

Марка	σ_B , кгс/мм	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	Ударная вязкость, кгс*м/см ²							
					-40°C		-50°C		-60°C		-70°C	
					KCV	ДВС	KCV	ДВС	KCV	ДВС	KCV	ДВС
13ХФЧА	53,5	39,5	27,7	0,74	27,6	100	31,2	100	27,0	100	26,0	100
09Г2С	46,0	34,0	32,0	0,74	11,6	-	-	-	8,3	-	-	-
13ХФА	52,0	41,5	27,5	0,80	-	-	22,2	100	22,8	100	22,8	100
17Г1С	53,0	40,8	25,5	0,77	-	-	8,9	32	9,3	30	7,8	27,3

Можно заметить, что сталь 13ХФА показывает хорошие значения ударной вязкости, даже при низких температурах.

В работе Беликова С.В. [11] было изучено влияние термообработки на структуру и механические свойства стали 13ХФА. Исследователи подметили, что межкритическая закалка стали 13ХФА от температуры в нижней части межкритического интервала (от 790 °С) позволяет добиться получения развитой субзеренной структуры феррита с размером субзерна 0,5 мкм, в то время как нагрев под закалку в верхнюю часть МКИ или однофазную γ -область приводит к образованию ферритных зерен, практически свободных от малоугловых границ. Автор исследовал однократную и двойную закалку, а также применение отпуска.

Похожие режимы описаны и в работе Мусихина С. А. [12]. Автор исследовал механические свойства после однократной закалки 890-930 °С и последующего отпуска при 680-710 °С и после двойной закалки (890-930 и 790-820 °С) и отпуска при 680-710 °С. В работе было показано, что увеличение продолжительности отпуска в исследуемом интервале времени ведет к снижению пределов прочности и текучести, что связано с соответствующими изменениями в структуре стали, рассматриваемыми в данной работе. Установлено, что увеличение времени отпуска свыше 50 минут, для стали предварительно закаленной из аустенитной области не приводит к изменению ударной вязкости. Показано, что увеличение температуры отпуска (продол-

жительностью 50 минут) с 680 до 710 °С, для стали предварительно закаленной от температуры 930 °С, приводит к снижению предела прочности на 40 МПа, снижению предела текучести на 50 МПа, при этом ударная вязкость увеличивается на 20 Дж/см². Повышение температуры отпуска с 680 до 710 °С при времени выдержки менее 15 минут не приводит к различиям в прочностных свойствах, при этом значения ударной вязкости заметно возрастают. Разница между значениями предела прочности и предела текучести, для стали предварительно закаленной из аустенитной области в среднем составляет 90 МПа.

Было установлено, что увеличение температуры закалки из МКИ с 790 до 820 °С после отпуска при температуре 670 °С в течение 50 минут приводит к повышению временного сопротивления разрыву на 45 МПа, а предела текучести на 40 МПа, при этом ударная вязкость снижается на 13 Дж/см². Разница в значениях предела прочности и предела текучести, для стали предварительно закаленной из МКИ составляет в среднем 108 МПа. Показано, что увеличение времени выдержки свыше 50 минут при отпуске стали предварительно закаленной из МКИ на температуру 670 °С вызывает заметное падение ударной вязкости.

В ходе исследования был проведен фрактографический анализ образцов испытанных на ударный изгиб с целью определения вида разрушения. Анализ показал, что сталь 13ХФА после термической обработки по рассматриваемым режимам преимущественно имеет вязкий характер разрушения.

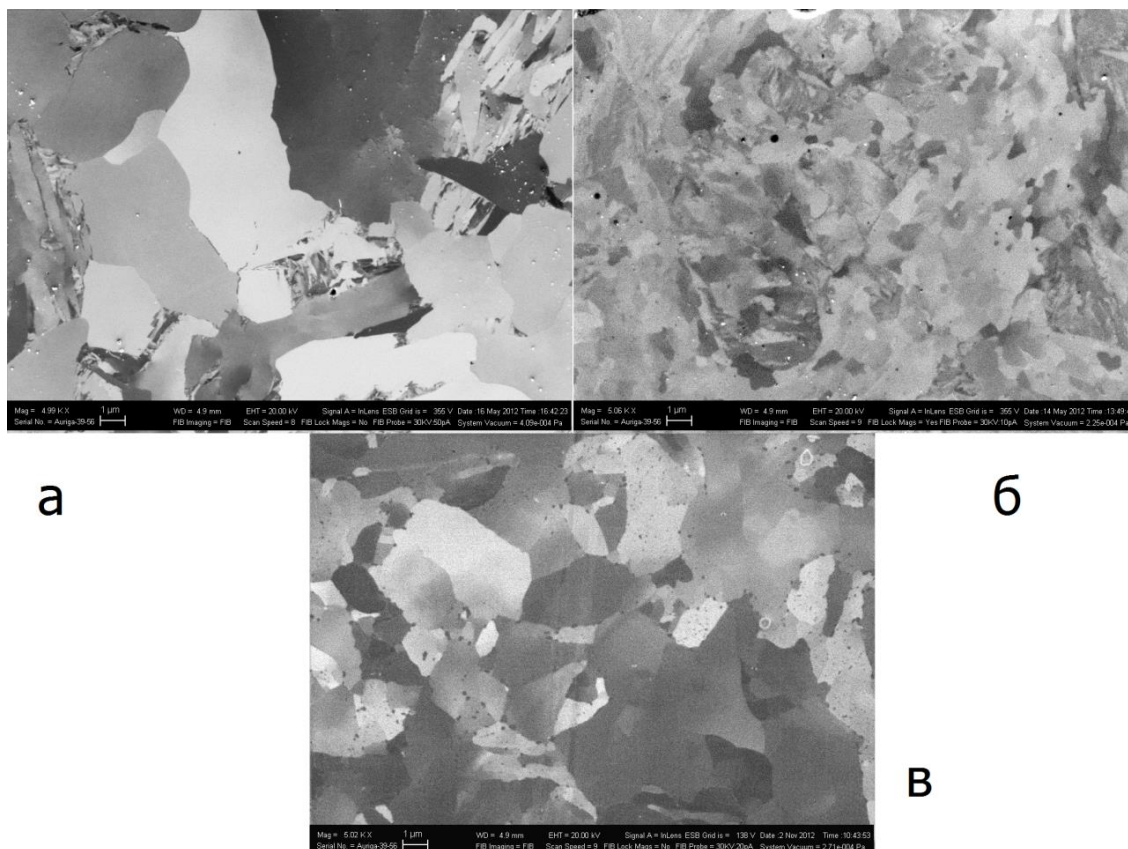


Рисунок 1.4 – Структура стали 13ХФА, а – закалка от 930 °С; б – закалка от 930 °С, закалка от 790 °С; в - закалка от 930 °С, закалка от 790 °С, отпуск при 650 °С в течение 50 минут [11]

В работе Маковецкого [15] также были изучены режимы термообработки. Автор пришел к выводам, что предварительная термообработка: закалка, нормализация, отжиг, проводимые от температуры 1050 °С, оказывает существенное влияние на ударную вязкость и долю вязкой составляющей в изломе стали 13ХФА, закаленной из МКИ с последующим высоким отпуском. В тех случаях, когда предварительной обработкой является отжиг или нормализация, приводящие к образованию феррито-перлитных структур, закалка от температур, немного превышающих критическую точку A_{c1} , приводит к сильнейшему охрупчиванию, обусловленному образованием пленки высокоуглеродистого аустенита по границам зерен феррита. При повышении температуры закалки из МКИ ударная вязкость и доля вязкого излома для

этих видов обработок повышается, но во всех случаях нормализация обеспечивает более высокую ударную вязкость, нежели отжиг. В тех случаях, когда в качестве предварительной термообработки была использована закалка от 1050 или 900 °С, наивысшая ударная вязкость наблюдается для температуры закалки, немного превышающей A_{c1} , т. е. при той температуре, которой соответствует минимальная ударная вязкость для отожженной и нормализованной стали. При повышении температуры аустенитизации ударная вязкость и доля вязкой составляющей предварительно закаленных образцов закономерно снижается.

2. Коррозионная стойкость. В работе Выбойщика Л.М. [13] были отмечены высокие показатели коррозионной стойкости этой стали, особо отмечая ее в H_2S -содержащих средах, в т.ч. и возможность получения высокой коррозионной стойкости в сварных швах. В работе Сергеевой К.И. [14] отмечается, что при определенных условиях обработки сталь 13ХФА демонстрирует хорошие показатели глубинной коррозии, по сравнению с коррозионно-стойкими жаропрочными сталями (рисунок 1.5).

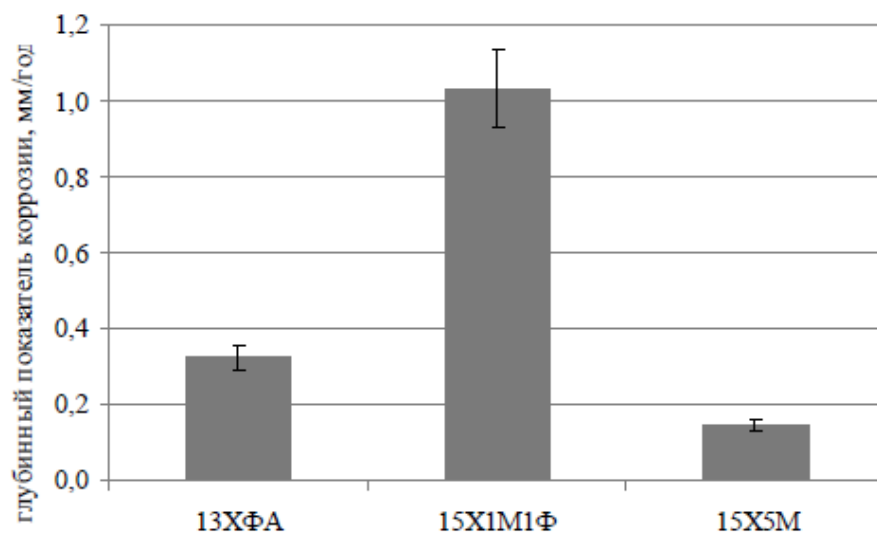


Рисунок 1.5 – Сравнение глубинной коррозии сталей 13ХФА, 15Х1М1Ф и 15Х5М после отпуска на сорбит

В работе Иоффе А.В. [10] авторы приходят к заключению, что стали марок 13ХФА и 13ХФЧА превосходят традиционные марки (09Г2С и 17Г1С)

по коррозионным характеристикам и рекомендуются к эксплуатации на месторождениях Коми и Западной Сибири. Стоит заметить, что, по мнению авторов, положительное влияние обеспечено отсутствием такого привычного в данных сталях элемента, как марганца, поскольку, обладая более высокой активностью по сравнению с железом, способствует образованию окислов и сульфидов марганца. Параметры кристаллической решетки оксидов и сульфидов марганца отличаются от оксидов и сульфидов железа, что приводит к разрыхлению продуктов коррозии и их отслаиванию от поверхности металла. Подобное отслаивание и разрыхление продуктов коррозии провоцирует растворение кристаллов карбоната и образования, в следствие этого, полостей и отверстий, через которые к металлу проникают коррозионно-активные компоненты. У стали 13ХФА такого не наблюдалось (рисунок 1.6).

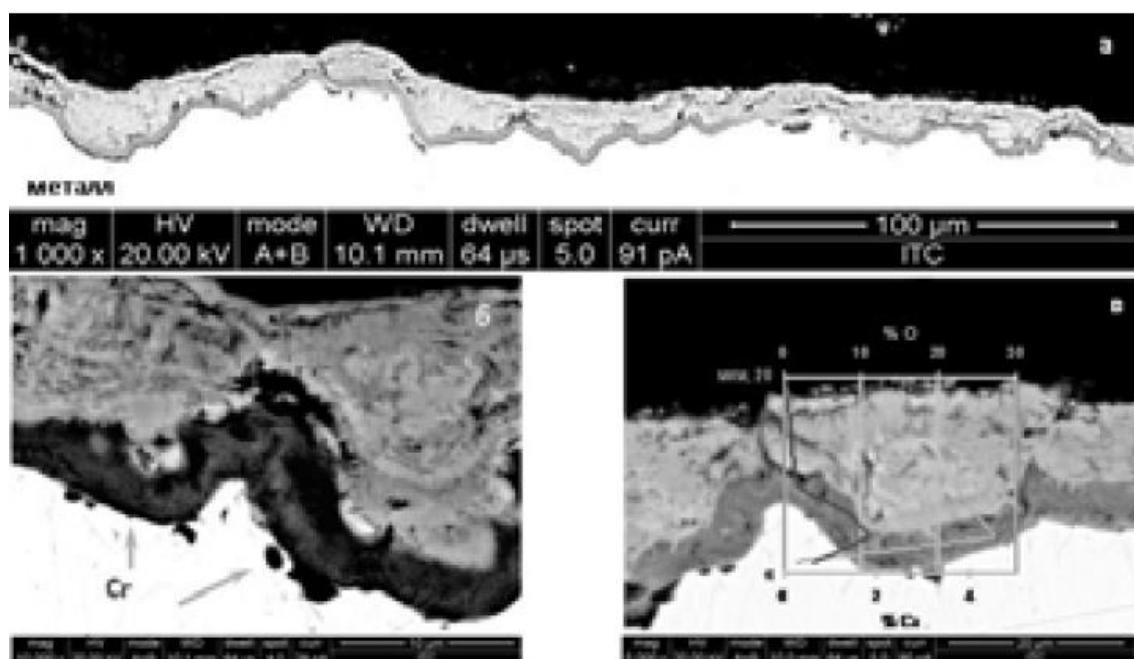


Рисунок 1.6 – Состав и строение продуктов коррозии образовавшихся на трубах из стали 13ХФА: а – панорамный вид, б – вид участка продуктов коррозии при большом увеличении, в) распределение Cr по сечению продуктов коррозии

3. Влияние термообработки на структуру и свойства стали 13ХФА. Из работы Маковецкого [15] известно, что в зависимости от вида предварительной термической обработки влияние температуры аустенитизации в МКИ на характеристики вязкости проявляется по-разному.

После нормализации или отжига по мере роста температуры закалки от A_{c1} к A_{c3} наблюдается увеличение ударной вязкости и доли вязкой составляющей (рисунок 1.7). В случае же предварительной закалки образцов по мере роста температуры аустенитизации наблюдается понижение ударной вязкости и доли вязкой составляющей. Для объяснения полученных результатов рассмотрим микроструктуру закаленных образцов стали 13ХФА после предварительной нормализации или отжига при 1050 °С, 1 час.

После закалки из МКИ от 755 °С сталь 13ХФА имеет феррито-перлитную микроструктуру с почти сплошной мартенситной сеткой по границам зерна (рисунок 1.8, а). В случае предварительной нормализации от 1050 °С фазовый состав и морфология те же, но величина ферритного зерна несколько мельче. При повышении температуры аустенитизации в МКИ до 770-800 °С зернограницные выделения аустенита (мартенсита) утолщаются и становятся прерывистыми (рисунок 1.8, б, в). Происходит образование аустенита в перлитных колониях, при этом участки образовавшейся γ -фазы оказываются рассеченными пластинами видманштеттового феррита, еще сохраняющимися при этих температурах. После резкого охлаждения аустенит превращается в бейнит закалки (рисунок 1.9 в, г).

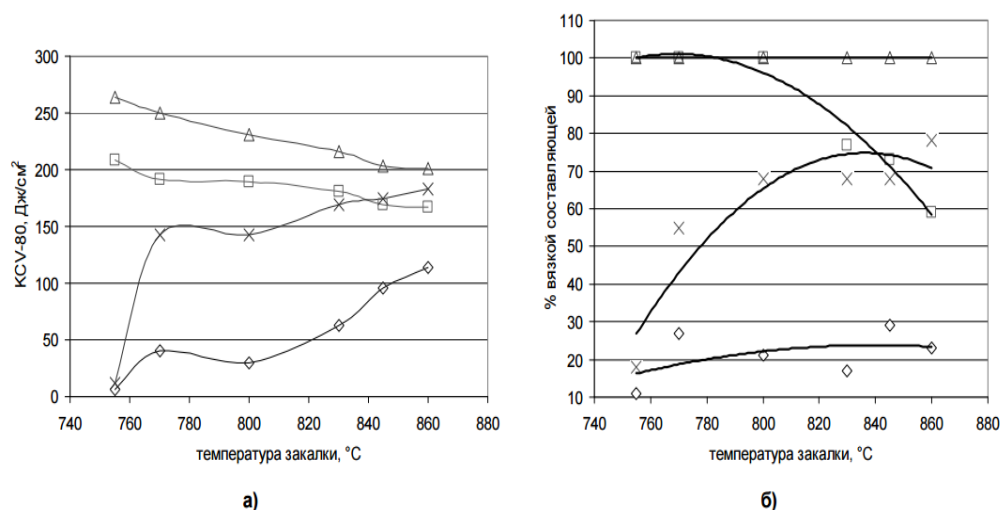
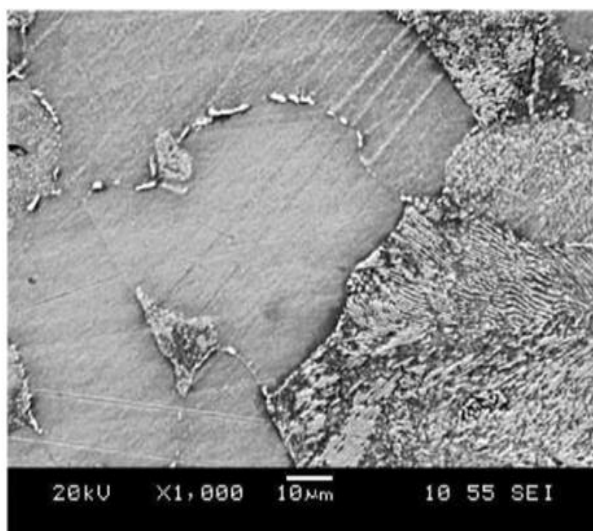
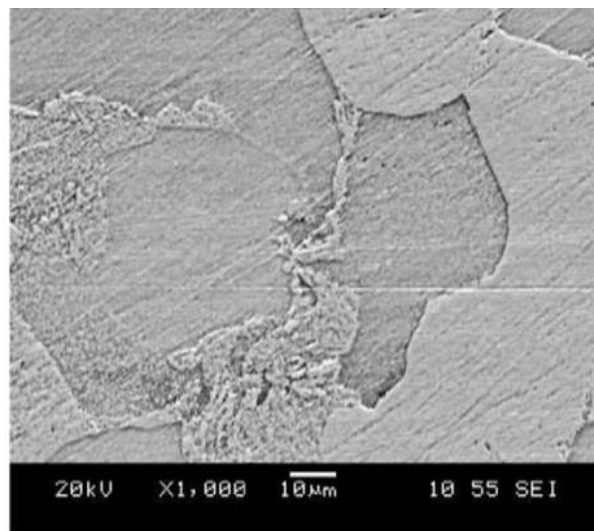


Рисунок 1.7 - Зависимость ударной вязкости (а) и доли вязкой составляющей в изломе ударных образцов (б) от температуры закалки из МКИ с последующим отпуском при 600 °С, 1 ч, для: ◇ – отжига при 1050 °С; □ – закалки от 1050 °С; × – нормализации от 1050 °С; Δ – закалки от 900 °С

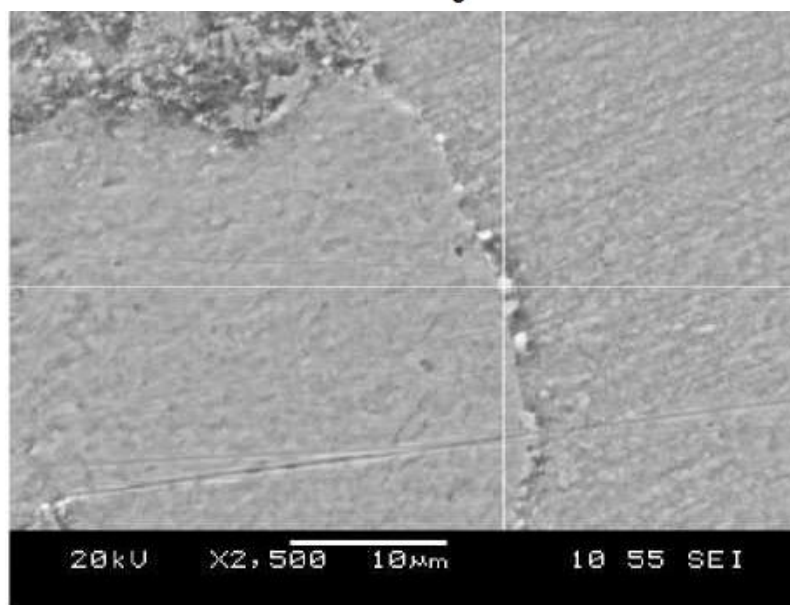
При повышении температуры ускоряется диффузия углерода в γ -фазе, поэтому аустенит, расширяясь от границ α -фазы и перлита, образует округлые зерна аустенита темного (после превращения) цвета (рисунки 1.9, в, г; 1.10, г, д), очень похожие на зерна неупорядоченного аустенита, возникающие при этих температурах (> 800 °С) в предварительно закаленных образцах. На рисунке 1.10, д стрелками показаны округлые зерна неупорядоченного и пластинки упорядоченного аустенита.



а



б



в

Рисунок 1.8 – Изменения структуры: а - после закалки от 755 °С и отпуска при 600 °С, б, в - после закалки от 770 и 800 °С и отпуска при 600 °С соответственно [15]

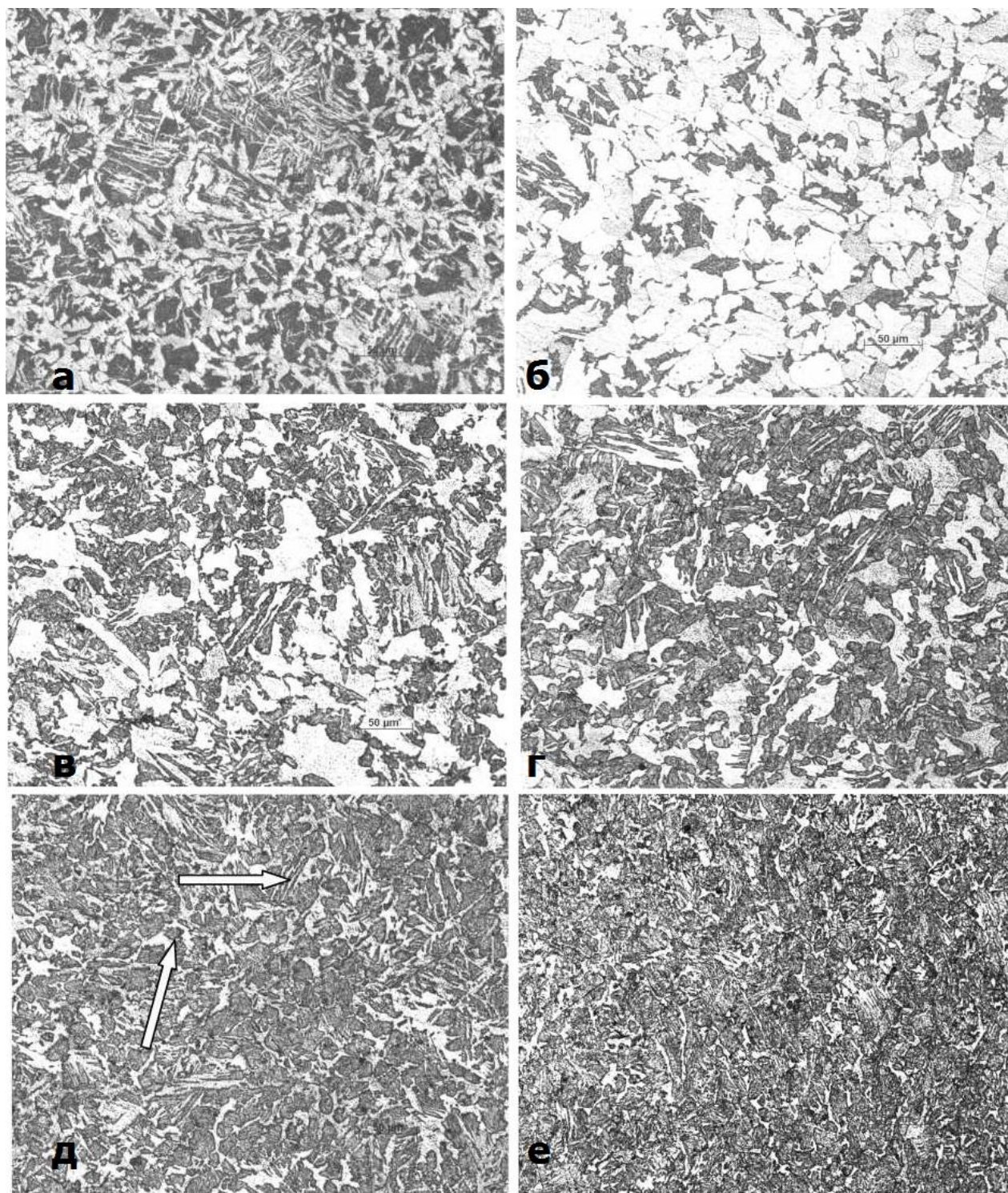


Рисунок 1.9 - Микроструктура образцов стали 13ХФА после нормализации от 1050 °С и последующей закалки из МКИ: а - выдержка при 755 °С; б - 770 °С; в - 800 °С; г - 830 °С; д - 845 °С; е - 860 °С, x500

В случае аустенитизации на 845 и 860 °С наблюдается большое количество зерен неупорядоченного аустенита, но еще сохраняются участки феррита, в том числе видманштетта, между иглами которого видны темно-серые пластины бывшей γ -фазы, ориентационно связанные с видманштеттом (рис. 1.9, д, е; 1.10, д, е).

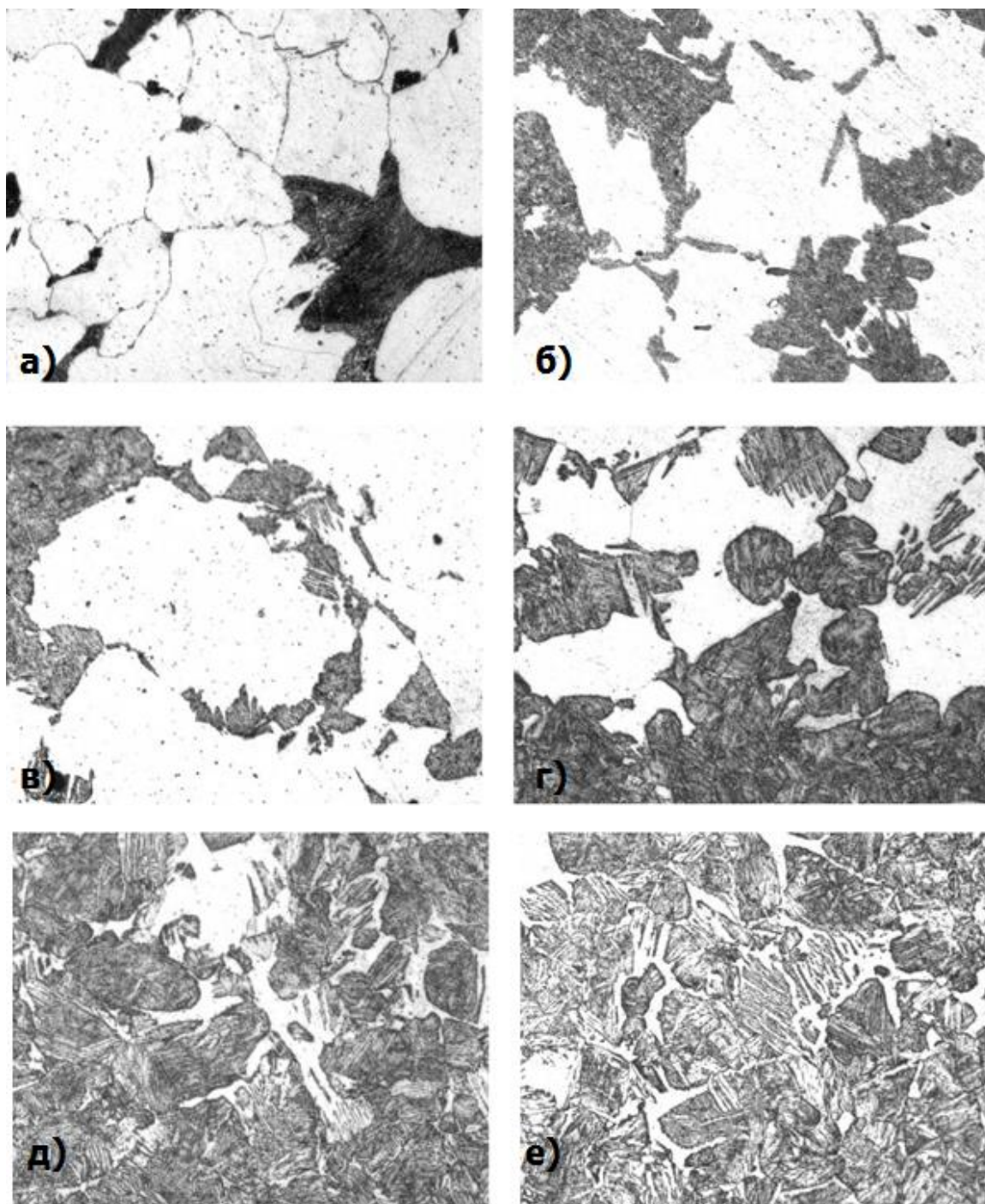


Рисунок 1.10 - Микроструктура образцов стали 13ХФА после отжига при 1050 °С и последующей закалки из МКИ: а - выдержка при 755 °С; б - 770 °С; в - 800 °С; г - 830 °С; д - 845 °С; е - 860 °С, х500

Характер зависимости ударной вязкости от твердости после обработки в МКИ и отпуска для образцов с различной исходной микроструктурой также различен. Можно сделать предположение, что при исходной бейнитной или мартенситной структуре уровень ударной вязкости определяется, во-первых, степенью протекания отпуска (рекристаллизации) структуры исходной заковки при температуре выдержки в МКИ, а во-вторых, количеством образовавшегося аустенита, который сам по себе благоприятствует росту ударной вязкости вследствие перекристаллизации, но после закалки на бейнит (мартенсит) и отпуска при невысокой температуре 600 °С понижает ударную вязкость и повышает твердость.

Однако помимо значений ударной вязкости, нам необходимо получить значение твердости, удовлетворяющее требованиям нормативной документации (не более 240 НV, что соответствует ~228 НВ). Маковецким была выведена зависимость (рисунок 1.11) твердости от термообработки, а также ударной вязкости (рисунок 1.12) от твердости при различных режимах ТО.

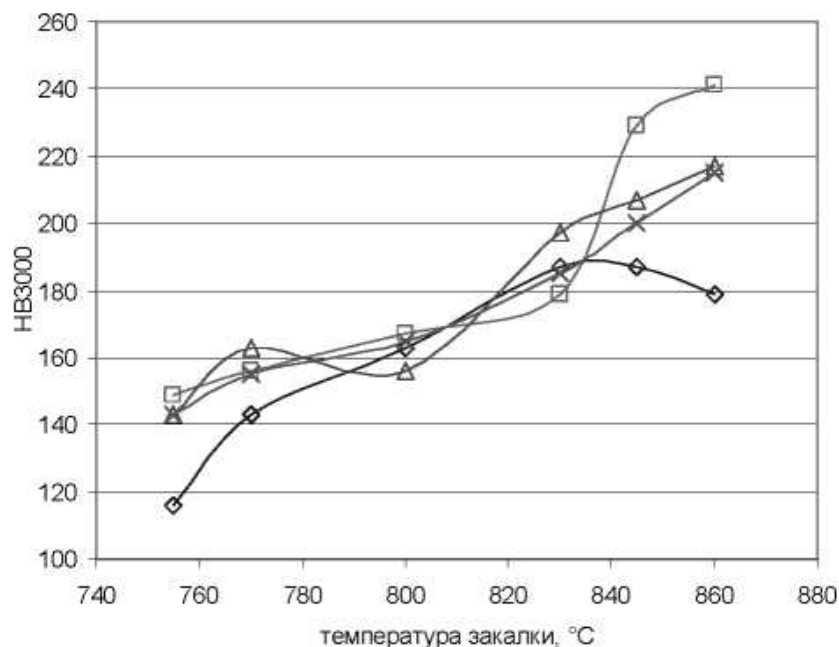


Рисунок 1.11 - Зависимость твердости от температуры закалки из МКИ с последующим отпуском при 600 °С, 1 ч, для различных вариантов предшествующей термической обработки: ◇ - отжиг при 1050 °С; □ - закалка от 1050 °С; X - нормализация от 1050 °С; Δ - закалка от 900 °С

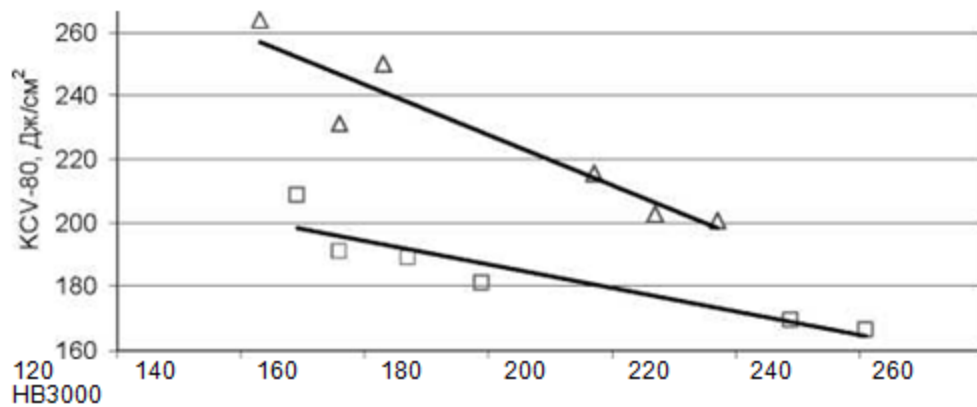


Рисунок 1.12 -. Зависимость ударной вязкости после закалки из МКИ и отпуски при 600 °С, 1 ч, от твердости и режима предварительной термической обработки: □ - закалка от 1050 °С; Δ - закалка от 900 °С

В работе Беликова С.В. [11] приводится зависимость механических параметров от режима ТО для стали 13ХФА (рисунок 1.13). По нему видно, что закалка из верхних температур МКИ ведет к увеличению KCV с меньшим изменением других характеристик (например, предела текучести).

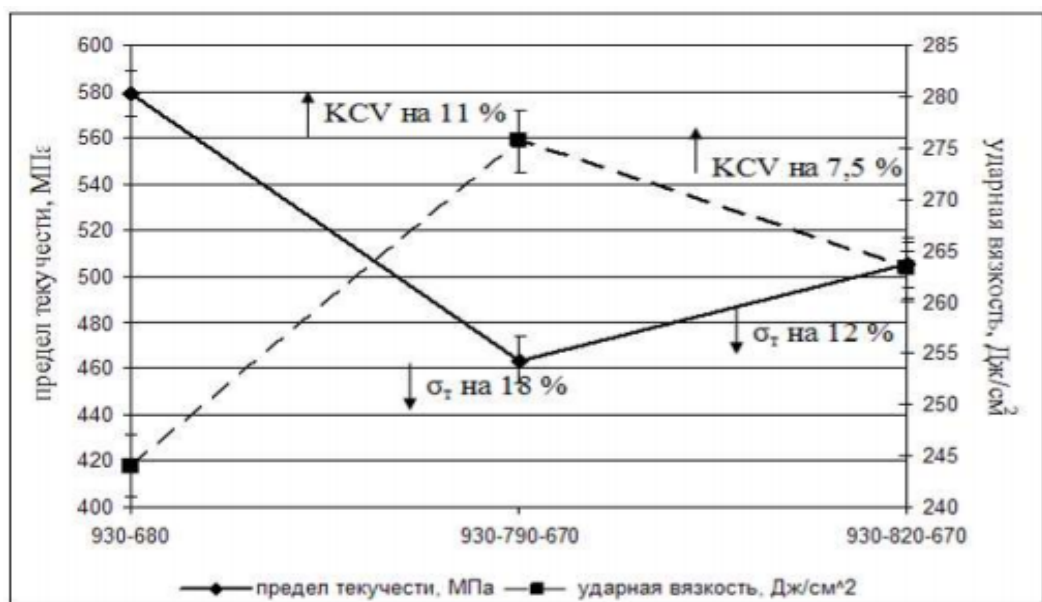


Рисунок 1.13 - Изменение прочностных и вязкостных свойств в зависимости от температур нагрева под закалку

Эти данные согласуются с работой [15], где наивысшая ударная вязкость после предварительной закалки от 900 °С наблюдается для температуры повторной закалки из МКИ, немного превышающей A_{c1} (760 °С).

В работах [13, 14] указывается, что отпуск из интервала 700-720°С приводит к образованию зернистых карбидов в ферритной матрице, что не только улучшает показатели ударной вязкости [12], но и обеспечивает высокую коррозионную стойкость.

1.4 Выводы

Анализ литературных данных показал, что запорная арматура, в частности задвижки клиновые, имеют ряд общих требований и рекомендаций, однако конкретные (численные) значения определенных параметров задаются в специальной нормативной документации, в связи с этим для вывода рекомендаций по использованию определенного материала необходимо опираться на документацию потребителя.

Также было показано, что сталь 13ХФА обладает комплексом механических и физических свойств (прочность, ударная вязкость, хладностойкость, коррозионная стойкость и т.д.), позволяющим использовать данную сталь в качестве материала для изготовления запорной арматуры, работающей в нефте- и газопроводах.

2. Комплексное исследование стали 13ХФА

Испытания включали в себя 2 серии экспериментов: над образцами материала запорной арматуры из стали 13ХФА и над образцами материала запорной арматуры из стали 09Г2С. Сталь 09Г2С часто используется для изготовления запорной арматуры и сравнение с ней позволяет оценить целесообразность изготовления запорной арматуры из других сталей.

2.1 Испытания на образцах материала задвижки

Проведены металлографические исследования, механические и коррозионные испытания металла задвижки клиновой производства ООО «Предприятие «Сенсор» из стали марки 13ХФА на соответствие требованиям:

1. Методических указаний Компании «Единые технические требования. Задвижки клиновые для промысловых и технологических трубопроводов Компании №П1-01.05М-0082»,
2. Действующей нормативно-технической документации на территории Российской Федерации.

Объект: на предприятии ООО «Предприятие «Сенсор»» была отобрана клиновая задвижка из стали 13ХФА в количестве 1 (одной) единицы (DN 100, PN 25 МПа). Внешний вид задвижки клиновой представлен на рисунке 2.1. Из элементов задвижки клиновой были изготовлены образцы для проведения испытаний в лаборатории ООО «Самарский ИТЦ». После изготовления образцам были присвоены условные маркировочные номера, приведенные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Маркировка деталей

ОСНОВНЫЕ ДЕТАЛИ ЗА- ДВИЖКИ КЛИНОВОЙ	МАРКИРОВКА
Корпус задвижки	АР 109-1
Крышка задвижки	АР 109-2
Клин задвижки	АР 109-3
Шпиндель задвижки	АР 109-4

Сопроводительные сведения по объекту указаны в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – Сопроводительные сведения

Наименование продукции	Задвижка клиновая DN 100, PN 25 МПа
Корпус задвижки	Сталь 13ХФА (плавка №1681), завод-изготовитель заготовок ОАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод»
Крышка задвижки	Сталь 13ХФА (плавка №1858), завод-изготовитель заготовок ОАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод»
Клин задвижки	Сталь 20Х13 (плавка №449487), завод-изготовитель заготовок ОАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод»
Шпиндель задвижки	Сталь 14Х17Н2 (Плавка №98222), завод-изготовитель ПАО «Днепроспецсталь»
Нормативный документ	ТУ 3741-001-22986183-2009



Рисунок 2.1 - задвижка клиновая DN 100, PN 25 МПа из стали марки 13ХФА производства ООО «Предприятие «Сенсор».

Комплексное исследование материала основных деталей задвижки клиновой из стали марки 13ХФА включает следующий порядок и виды испытаний:

По корпусу задвижки:

- Образцы на определение химического состава материала (испытание по ГОСТ 18895-97),
- Образцы для анализа микроструктуры, включая оценку неметаллических включений (оптическая и электронная микроскопия, испытание по ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1778-70),
- Образцы для замера твердости материала (твердость по Виккерсу, испытание по ГОСТ 2999-75),
- Образцы для проведения испытания на одноосное растяжение материала (испытание по ГОСТ 1497-84),
- Образцы KCU для проведения испытания на ударную вязкость материала (испытание по ГОСТ 9454-78),
- Образцы KCV для проведения испытания на ударную вязкость ма-

териала (испытание по ГОСТ 9454-78),

- Образцы для проведения испытаний на стойкость к водородному растрескиванию материала (ВР) (испытание по NACE TM0284),
- Образцы для проведения испытаний на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением материала (СКРН, метод А, испытание по NACE TM0177),
- Образцы для проведения испытаний на стойкость к общей коррозии в сероводородсодержащей среде (испытание по методике ООО «Самарский ИТЦ» СТО №002- 13).

По крышке задвижки:

- Образцы на определение химического состава материала (испытание по ГОСТ 18895-97),
- Образцы для анализа микроструктуры, включая оценку неметаллических включений (оптическая и электронная микроскопия, испытание по ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1778-70),
- Образцы для замера твердости материала (твердость по Виккерсу, испытание по ГОСТ 2999-75),

Образцы стали 09Г2С были вырезаны из запорной арматуры DN 150, PN 10 МПа (ГОСТ 19281-89, «Прокат из стали повышенной прочности»). Изготовлены были:

- Образцы на определение химического состава материала (испытание по ГОСТ 18895-97),
- Образцы для анализа микроструктуры, включая оценку неметаллических включений (оптическая и электронная микроскопия, испытание по ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1778-70),
- Образцы для замера твердости материала (твердость по Виккерсу, испытание по ГОСТ 2999-75),
- Образцы для проведения испытания на одноосное растяжение материала (испытание по ГОСТ 1497-84),
- Образцы КСУ для проведения испытания на ударную вязкость ма-

териала (испытание по ГОСТ 9454-78),

- Образцы KCV для проведения испытания на ударную вязкость материала (испытание по ГОСТ 9454-78),
- Образцы для проведения испытаний на стойкость к водородному растрескиванию материала (ВР) (испытание по NACE TM0284),
- Образцы для проведения испытаний на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением материала (СКРН, метод А, испытание по NACE TM0177),
- Образцы для проведения испытаний на стойкость к общей коррозии в сероводородсодержащей среде (испытание по методике ООО «Самарский ИТЦ» СТО №002- 13).

2.2 Определение химического состава

Химический состав материала (таблица 2.3) *образца корпуса задвижки* клиновой (**DN 100**) является близким к химическому составу для низколегированной хладостойкой стали с повышенным содержанием хрома в соответствии с ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082 (близким к химическому составу стали **марки 13ХФА**).

Таблица 2.3 – Химический состав корпуса задвижки

	Массовая доля элементов, %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
API 09-1	0,128	0,235	0,523	0,009	0,007	0,542
П1-01.05М-0082	0,11-0,17	0,17-0,40	0,45-0,70	н.б. 0,015	н.б. 0,005	0,5-1,0
	Ni	Mo	Al	Cu	V	
API 09-1	0,074	0,013	0,029	0,205	0,0681	
П1-01.05М-0082	н.б. 0,30	н.б. 0,30	0,02- 0,05	н.б. 0,30	0,04-0,10	

Результаты *химического анализа исследуемого материала крышки* задвижки (**DN 100**) приведены в таблице 2.4. Химический состав материала образца крышки задвижки клиновой является близкую к химическому составу для низколегированной хладостойкой стали с повышенным содержанием хрома в соответствии с ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082 (близким к химическому составу стали **марки 13ХФА**).

Таблица 2.4 – Результаты химического анализа материала крышки

Маркировка	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V
AP 109-2	0,11	0,27	0,53	0,00	0,00	0,58	0,24	0,03	0,00	0,18	0,04
ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1- 01.05М-0082	0,11- 0,17	0,17- 0,40	0,45- 0,70	н.б. 0,015	н.б. 0,005	0,5- 1,0	н.б. 0,30	н.б. 0,30	0,02- 0,05	н.б. 0,30	0,04- 0,10

Химический состав исследуемого *материала корпуса задвижки (DN 150)* приведен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Химический состав образца материала задвижки

	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V
Образец	0,10	0,71	1,62	0,01	0,003	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	< 0,01
ГОСТ 19281-89	н.б. 0,12	0,5- 0,8	1,3- 1,7	н.б. 0,03	н.б. 0,04	н.б. 0,3	н.б. 0,30	-	-	н.б. 0,30	-

Химический анализ показал, что состав образца материала задвижки соответствует **марке 09Г2С** по ГОСТ 19281-89.

2.3 Результаты исследования неметаллических включений и структуры

Оценка неметаллических включений *металла корпуса задвижки (сталь 13ХФА)* проводилась на нетравленных микрошлифах. Неметаллические включения преимущественно имеют округлую форму (рисунок 2.2). Размер включений не превышает ~5 мкм. Анализ с применением электронной микроскопии показал, что неметаллические включения двухфазные, тёмная область включения представлена оксисульфидом алюминия, а светлая область представлена оксисульфидом марганца и кальция.



Рисунок 2.2 – Неметаллические включения материала корпуса задвижки, сталь 13ХФА

Результаты исследований микроструктуры металла корпуса представлены на рисунке 2.3. Балл зерна соответствует 8 номеру по ГОСТ 5639.

Микроструктура металла корпуса феррито-карбидная. Просматривается четкая ориентация структуры, унаследованной от бейнитной структуры

после закалки (рисунок 2.3). Сформировавшиеся структуры соответствуют термической обработке, включающей закалку и отпуск.

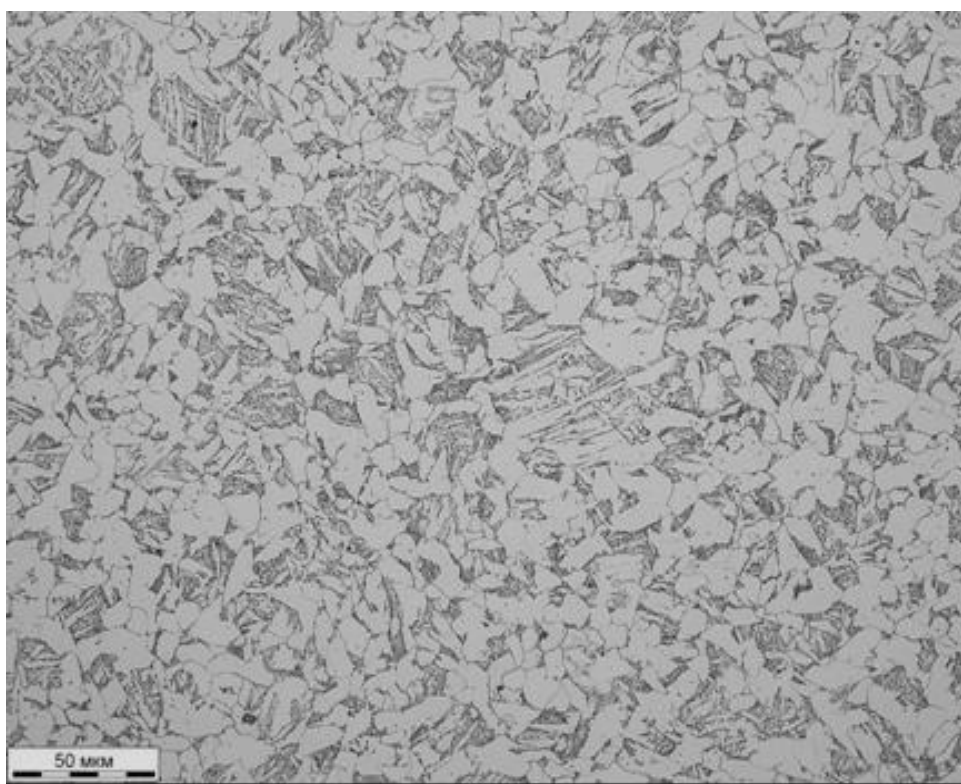
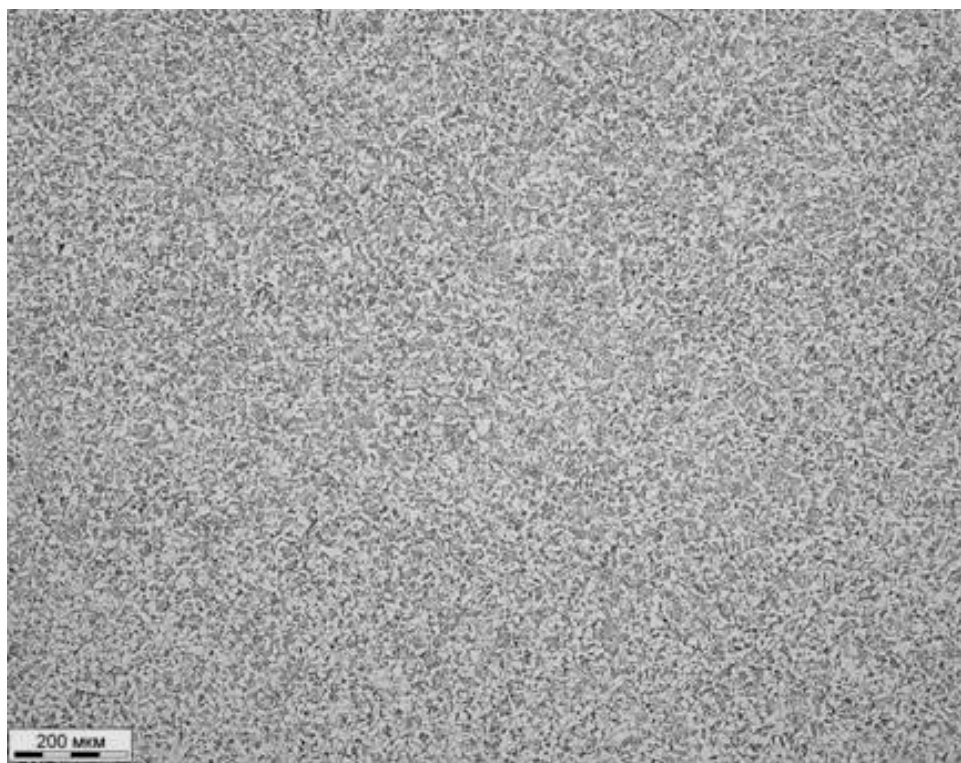


Рисунок 2.3 – Микроструктура образцов материала корпуса

Оценка неметаллических *включений металла крышки задвижки*

(*сталь 13ХФА*) проводилась на нетравленных микрошлифах. Размер включений не превышает ~5 мкм.

Результаты исследований микроструктуры металла крышки задвижки представлены на рисунке 2.4. Балл зерна соответствует 8 номеру по ГОСТ 5639. Микроструктура металла крышки задвижки феррито-карбидная, соответствующая термообработке, включающей закалку и отпуск.

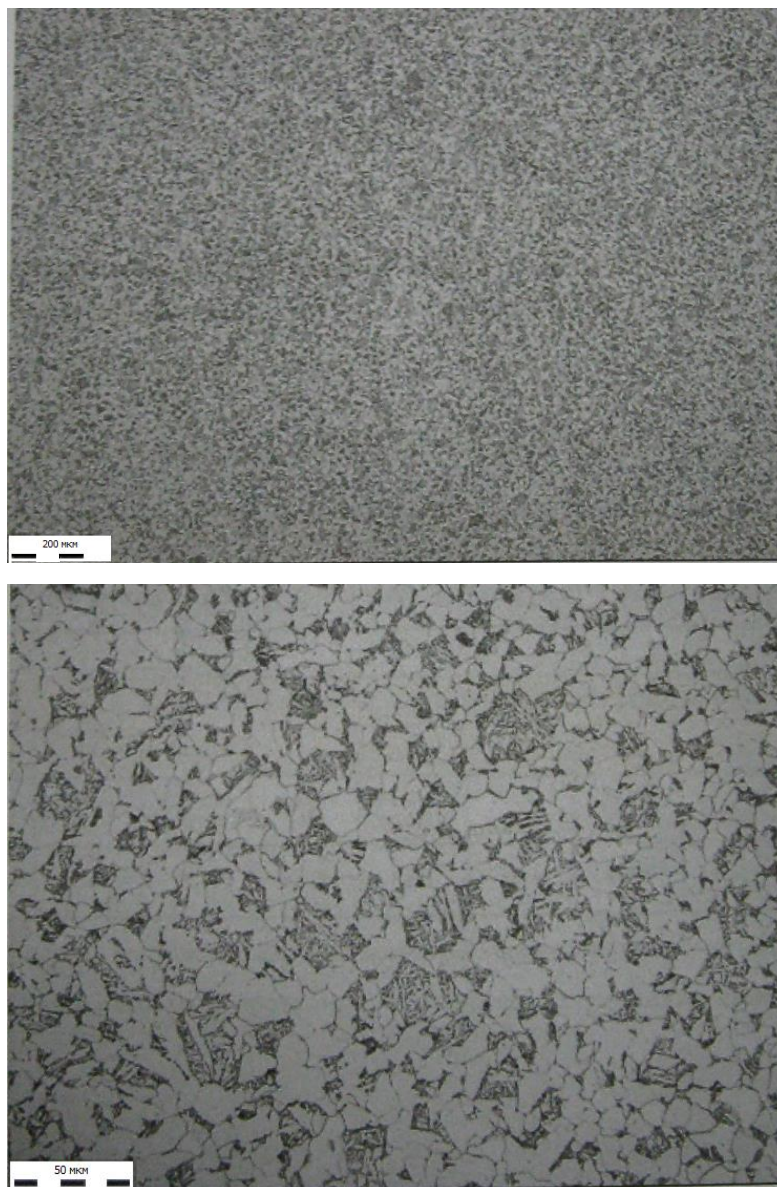


Рисунок 2.4 – Микроструктура образца материала крышки задвижки, сталь 13ХФА

Оценка неметаллических включений материала корпуса задвижки (сталь 09Г2С). Результат анализа неметаллических включений показан на рисунке 2.5.

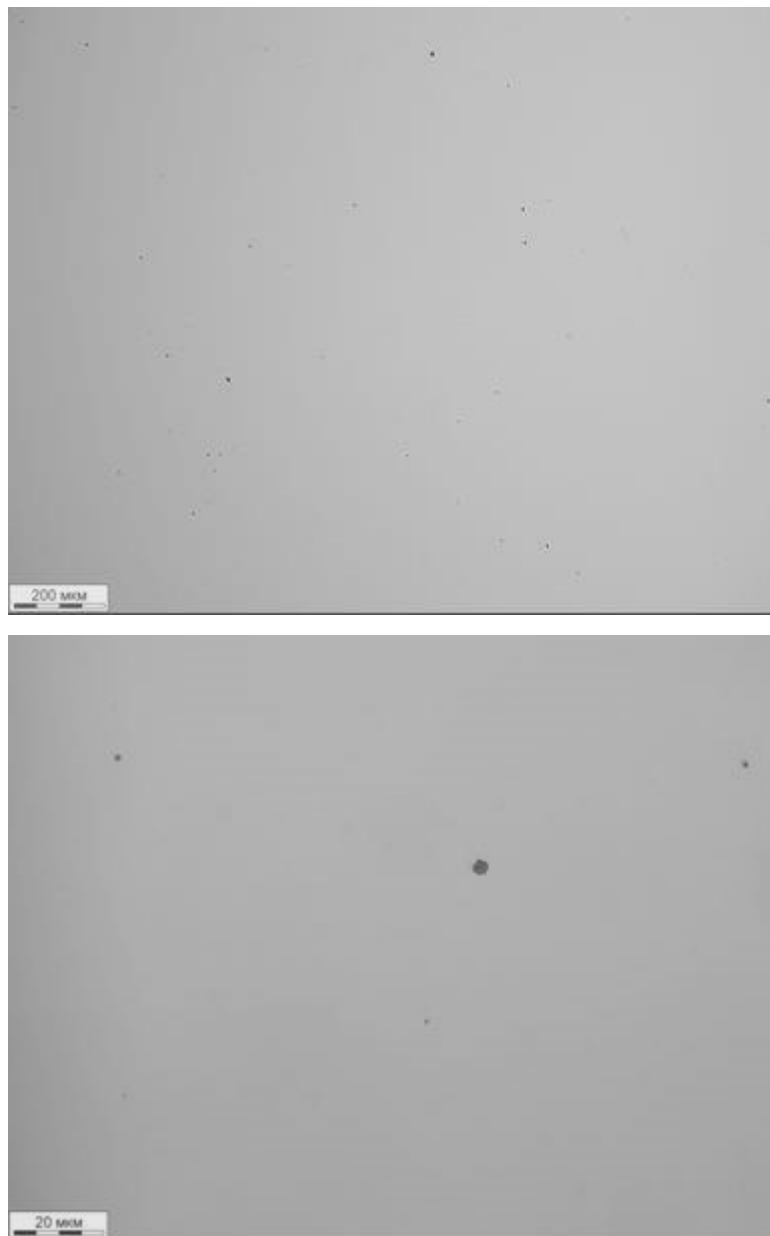


Рисунок 2.5 – Анализ неметаллических включений материала корпуса задвижки, сталь 09Г2С

Микроструктура материала корпуса задвижки (сталь 09Г2С). Анализ микроструктуры проводился в двух местах задвижки: в центре (рисунок 2.6) и на поверхности (рисунок 2.7)

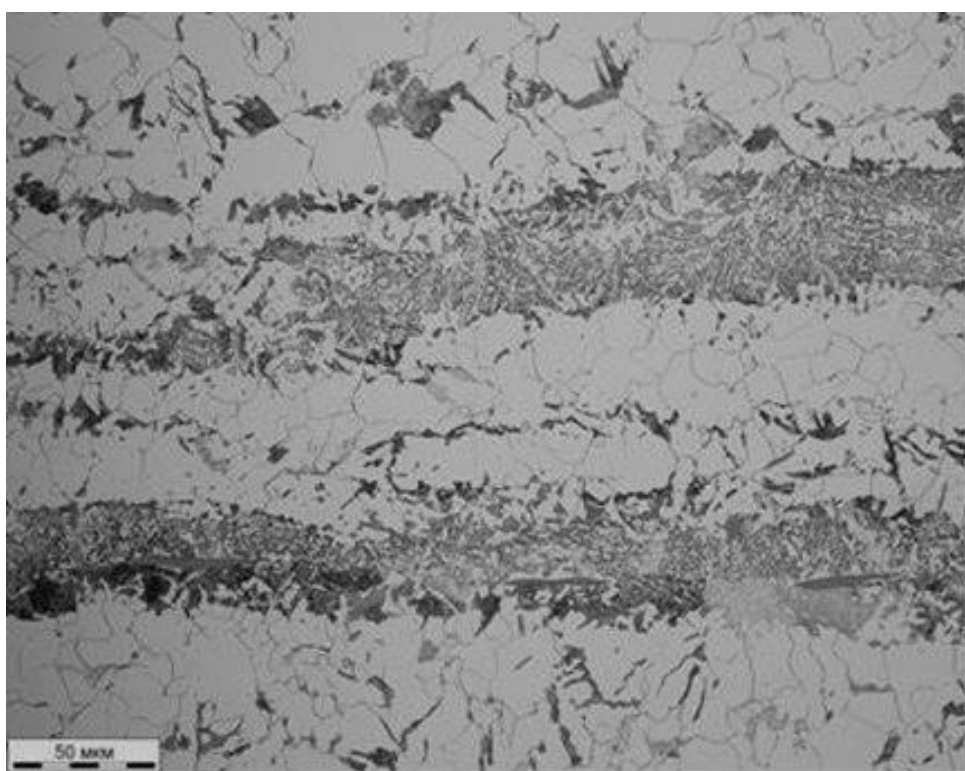
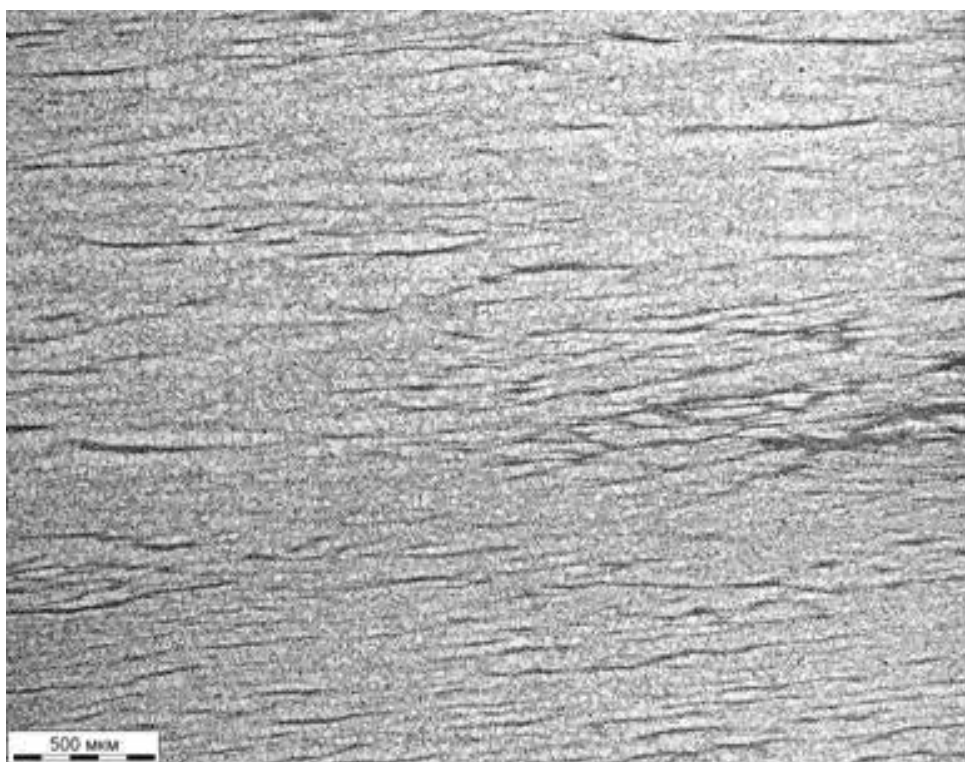


Рисунок 2.6 – Структура металла в центральной части корпуса задвижки,
сталь 09Г2С

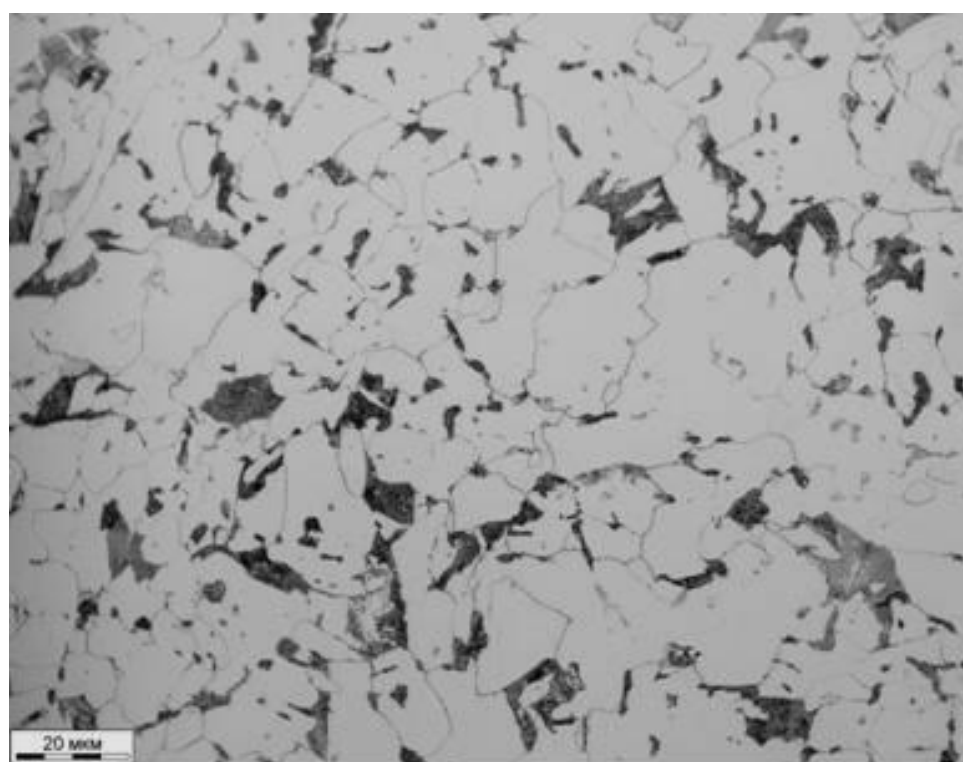
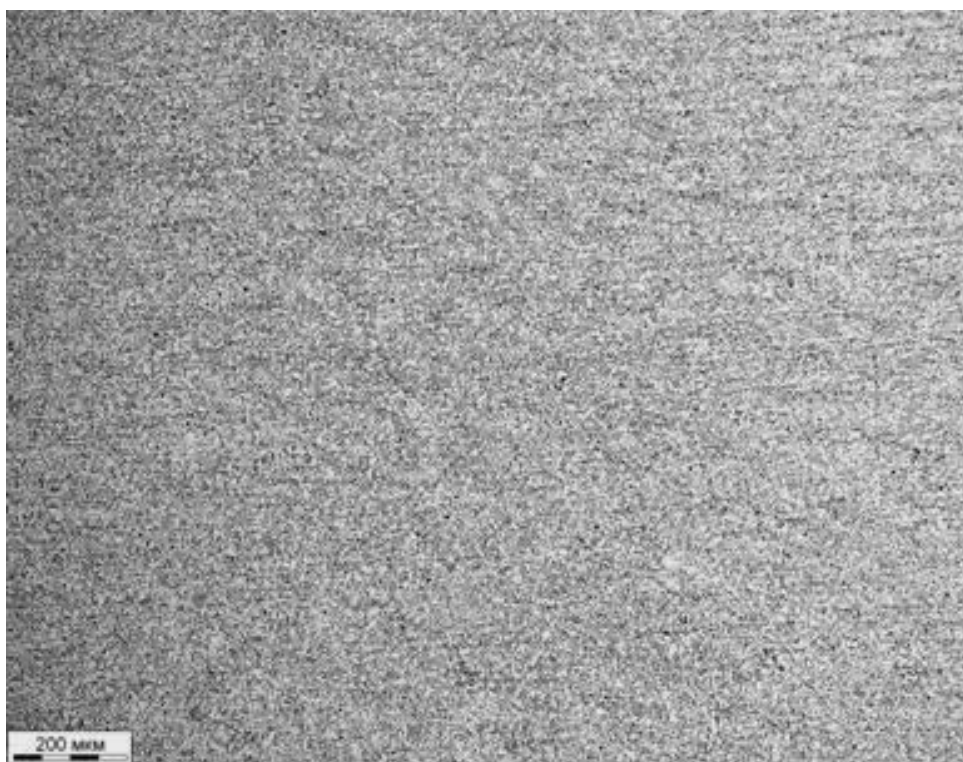


Рисунок 2.7 – Структура металла поверхностной области корпуса задвижки, сталь 09Г2С

Металл корпуса задвижки характеризуется структурной неоднородностью. Металл поверхностных объемов задвижки имеет структуру нормализованной стали, а именно феррито-перлитной структурой с пластинчатой фор-

мой цементита внутри перлитных зерен. Балл зерна соответствует 9 номеру по ГОСТ 5639.

Металл центральных объемов корпуса задвижки преимущественно имеет структуру закаленной стали, которая представлена бейнитом (верхним и нижним) и некоторым количеством остаточного аустенита.

2.4 Механические испытания

Образцы *металла корпуса задвижки (сталь 13ХФА)* были испытаны на одноосное растяжение, ударную вязкость и проведены измерения твердости. Результаты испытаний материала корпуса задвижки приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Механические свойства металла корпуса задвижки

Маркировка	Временное сопротивление, кгс/мм ² (МПа)	Предел текучести, кгс/мм ² (МПа)	Отношение предела текучести к временному сопротивлению	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Средние результаты по 5-ти цилиндрическим образцам					
AP109-1 корпус задвижки	52,10 (510.92)	43,00 (421.68)	0,82	30,70	79,70

Результаты испытаний на ударную вязкость образцов материала корпуса задвижки приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Ударная вязкость металла корпуса задвижки

Маркировка (номер образ- ца)		Тип образца	Т испытан- ний, °С	Ударная вязкость		Требования №П 1-01.05М-0082
				Дж/см ²	кгс·м/см ²	
корпус за- движки АР109-1	1	KCV	-40	327,81	33,45	не менее 2,0 кгс*м/см2
	2			412,58	42,10	
	3			336,73	34,36	
	4			295,57	30,16	
	5			317,81	32,43	
	6			339,77	34,67	
Среднее				338,38	34,53	
корпус за- движки АР109-1	1	KCV	-60	288,90	29,48	не менее 2,0 кгс*м/см2
	2			333,00	33,98	
	3			222,56	22,71	
	4			312,62	31,90	
	5			346,43	35,35	
	6			261,95	26,73	
среднее				294,25	30,03	
корпус за- движки АР109-1	1	KCU	-60	376,70	38,40	не менее 4,0 кгс*м/см2
	2			359,51	36,65	
	3			389,13	39,67	
среднее				375,11	38,24	

Значения твердости HV₁₀ материала *корпуса задвижки (сталь 13ХФА)* приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Твердость металла корпуса задвижки

Маркировка	Шкала	Значение твердости		
АР109-1	HV ₁₀	171,2	164,7	167,7
Требования ЕТТ «НК Рос- нефть»		Не более 240		

На образцах металла *крышки задвижки (сталь 13ХФА)* измерялась твердость. Значения полученной твердости HV₁₀ материала крышки задвижки приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Твердость металла крышки задвижки

Маркировка	Шкала	Значение твердости		
		1	2	3
АР 109-2 крышка задвижки	HV ₁₀	171,0	169,7	168,3
Требования ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» Ж11-01.05М-0082		Не более 240		

Механические испытания образцов при испытании на одноосное растяжение материала корпуса задвижки (сталь 09Г2С). Результаты механических испытаний представлены в таблицах 2.10 – 2.12.

Таблица 2.10 - Ударная вязкость корпуса задвижки, сталь 09Г2С

		Тип образца	Т испытаний, °С	Ударная вязкость	
				Дж/см ²	кгс·м/см ²
корпус	1	KCV	-60	84,18	8,59
	2			61,35	6,26
	3			357,11	36,44
среднее				167,55	17,10
корпус	1	KCU	-60	405,72	41,40
	2			408,76	41,71
	3			430,91	43,97
среднее				415,13	42,36

Таблица 2.11 – Механические характеристики материала корпуса задвижки, сталь 09Г2С

	Временное сопротивление σ_b , кгс/мм ² (МПа)	Предел текучести σ_t , кгс/мм ² (МПа)	Отношение предела текучести к временному сопротивлению	Относительное удлинение δ_s , %	Относительное сужение ψ , %
корпус	51,50 (505.04)	29,10 (285.37)	0,56	35,27	77,97

Таблица 2.12 –Твердость материала корпуса задвижки, сталь 09Г2С

	шкала	Значение твердости		
		1	2	3
корпус	HV ₁₀	187,3	184,6	187,4

2.5 Результаты испытаний в агрессивных средах

Стойкость к коррозии *металла корпуса задвижки (сталь 13ХФА)* оценивалась в сероводородсодержащей среде по методике ООО «Самарский ИТЦ» СТО №002-13 (время выдержки 96 часов). Скорость общей коррозии исследуемых образцов материала корпуса задвижки из стали марки 13ХФА приведена в таблице 2.13. Средняя скорость коррозии в сероводородсодержащей среде образцов металла корпуса задвижки составила 0,20 мм/год.

Таблица 2.13 – Скорость общей коррозии материала корпуса задвижки, сталь 13ХФА

Маркировка	№ образца	Скорость коррозии, мм/год	Средняя скорость коррозии, мм/год	рН	Концентрация H ₂ S, ppm
AP 109-1	1	0,20	0,20		
	2	0,20		исх.6,25	600±200
	3	0,20			
Требования ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082			не более 0,30	-	-

Стойкость *металла корпуса задвижки (сталь 13ХФА)* к водородному растрескиванию оценивалась по стандарту NACE TM0284 (время выдержки 96 часов). Результаты испытаний металла корпуса задвижки на стойкость к водородному растрескиванию представлены в таблице 2.14. Вид образцов после испытаний представлен на рисунке 2.8. Блистеринги на поверхности образцов отсутствуют. Трещины водородного растрескивания в металле корпуса задвижки не выявлены.

Таблица 2.14 – Стойкость к водородному растрескиванию, сталь 13ХФА

Маркировка	Коэффициенты трещин	
	CLR, %	CTR, %
API 09-1 корпус задвижки	0	0

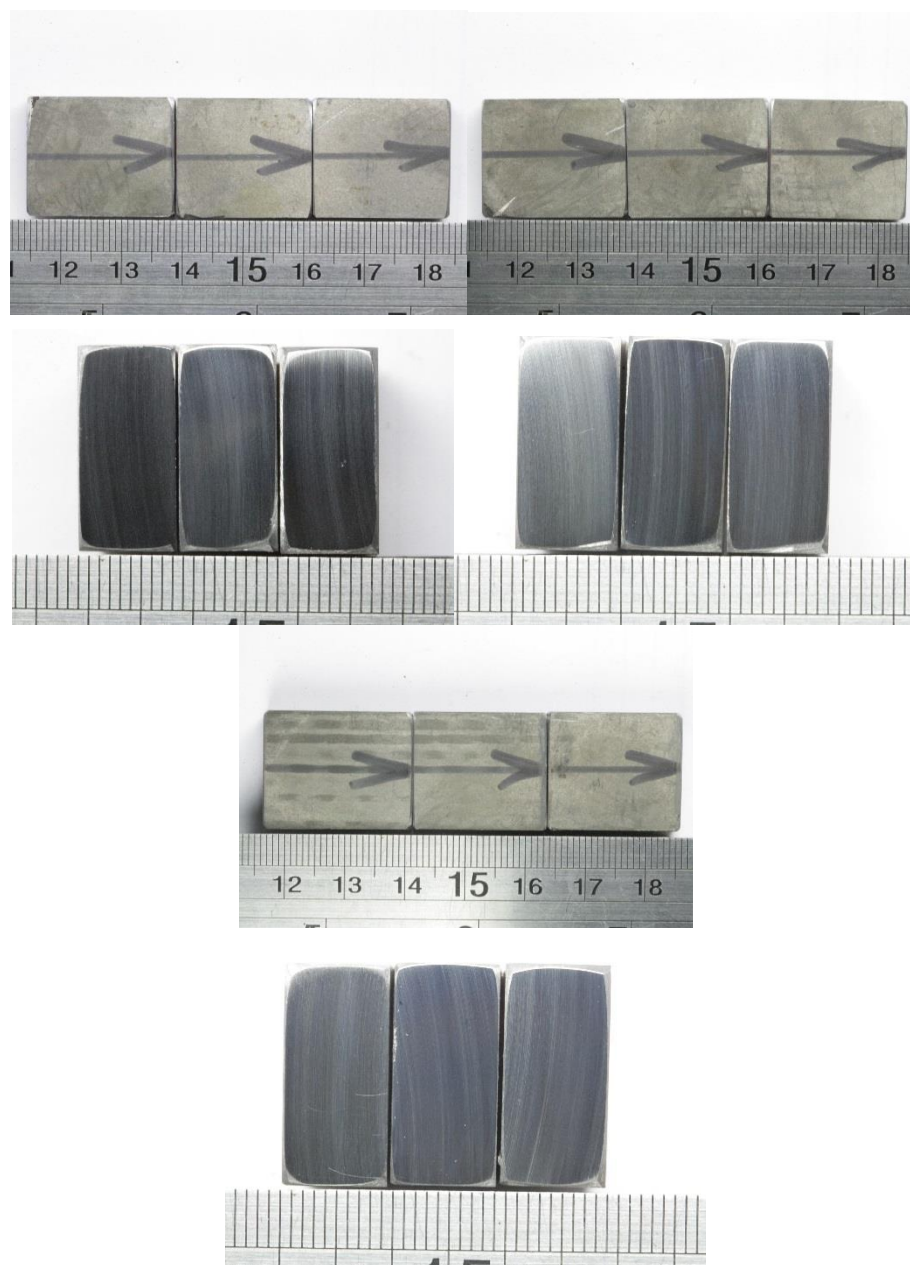


Рисунок 2.8 - Образцы металла корпуса задвижки после испытания на водородному растрескиванию по стандарту NACE TM0284, сталь 13ХФА

Стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением *материала корпуса задвижки (сталь 13ХФА)*. Стандартным испытанием, позволяющим определить склонность металла к коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН), является испытание цилиндрических образцов в среде NACE TM0177 при постоянной нагрузке.

Испытание заключается в определении времени до разрушения образцов металла под действием одноосного растягивающего напряжения заданного уровня в сероводородсодержащей среде. Продолжительность испыта-

ний - 720 час. В случае разрыва образцов до истечения указанного времени, испытания прекращаются. Фиксируется время до разрушения образца.

Результаты испытаний металла корпуса задвижки на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением представлены в таблице 2.15. Вид образцов после испытаний представлен на рисунке 2.9. Образцы металла корпуса задвижки из стали марки 13ХФА под нагрузкой 72 % от минимального гарантированного предела текучести по ТУ 3741-001-22986183-2009 выдержали (без разрушения) базовое время испытаний 720 часов ($\sigma_{th} = 0,72\sigma_{0,2}$).

Таблица 2.15 – Стойкость металла корпуса задвижки к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением, сталь 13ХФА

Материал	Результаты испытания образцов на СКРН, по стандарту NACE0177
13ХФА AP109-1	образец - без разрушения (Нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ТУ 3741-001-22986183-2009)
	образец - без разрушения (Нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ТУ 3741-001-22986183-2009)
	образец - без разрушения (Нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ТУ 3741-001-22986183-2009)



Рисунок 2.9 – Внешний вид образцов после испытаний на СКРН

Стойкость к коррозии *металла корпуса задвижки (сталь 09Г2С)* оценивалась в сероводородсодержащей среде по методике ООО «Самарский ИТЦ» СТО №002-13 (время выдержки 96 часов). Средняя скорость коррозии в сероводородсодержащей среде образцов металла корпуса задвижки составила **0,30 мм/год**.

Испытание *образцов корпуса задвижки (сталь 09Г2С)* на стойкость к водородному растрескиванию. Стойкость металла корпуса задвижки из стали марки 09Г2С к водородному растрескиванию оценивалась по стандарту NACE TM0284 (время выдержки 96 часов).

В металле корпуса шарового задвижки **были обнаружены водородные трещины (CLR 52%, CTR 13%)**. На поверхности образцов обнаружено появление блистерингов (рисунки 2.10-2.11).

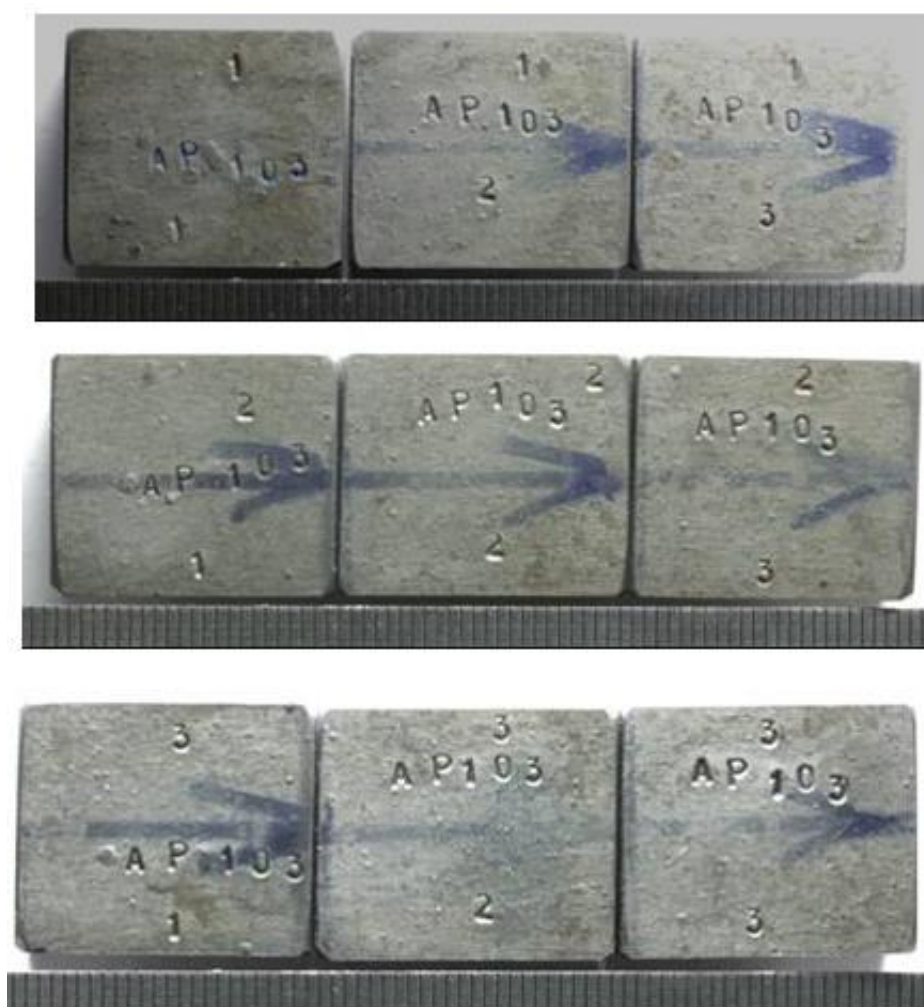


Рисунок 2.10 – Образцы после испытания на стойкость к водородному растрескиванию, сталь 09Г2С

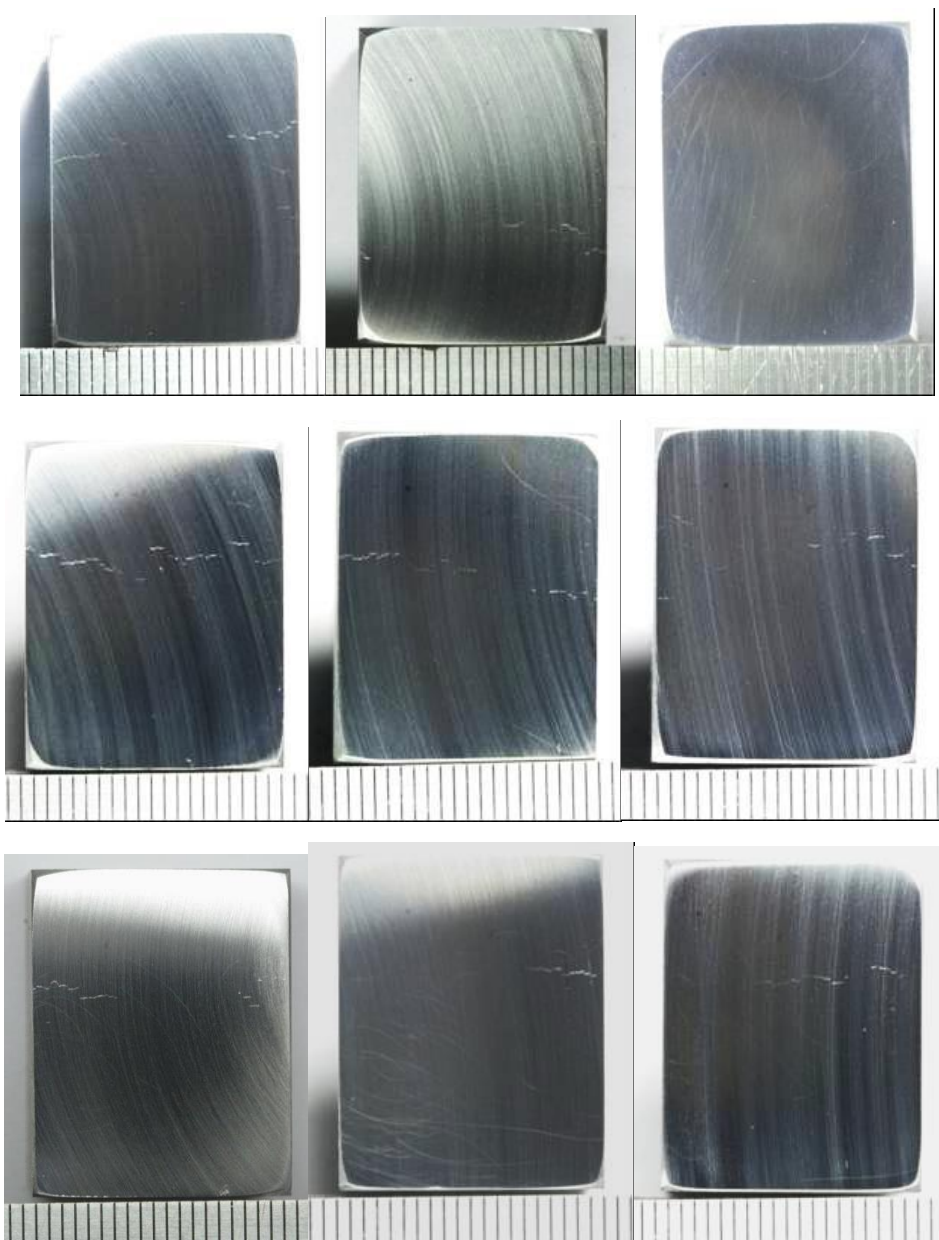


Рисунок 2.11 – Образцы после испытаний на стойкость к водородному растрескиванию, сталь 09Г2С

Испытания *образцов материала корпуса задвижки (сталь 09Г2С)* на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением. Результаты показаны в таблице 2.16 и на рисунке 2.12.

Таблица 2.16 – Стойкость металла корпуса задвижки к сульфидному растрескиванию под напряжением, сталь 09Г2С

Марка стали	Результаты испытания образцов на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением СКРН (метод А), по стандарту NACE0177
09Г2С	1 образец – <u>без разрушения</u> (Нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ГОСТ 19281-89) 2 образец – <u>разрушился</u> (Время до разрушения 384 ч., нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ГОСТ 19281-89) 3 образец – <u>без разрушения</u> (Нагрузка: 72% от минимального гарантированного предела текучести по ГОСТ 19281-89)



Рисунок 2.12 - Внешний вид образцов после испытания на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по методу А, испытание по стандарту NACE TM0177.

2.6 Выводы

Выводы по испытанию материала задвижки клиновой, сталь

13ХФА: Проведенный комплекс испытаний материала основных деталей задвижки клиновой (DN 100, PN 25 МПа) производства ООО «Предприятие «Сенсор» показал:

Химический состав материала корпуса и крышки задвижки является близким к химическому составу для низколегированной хладостойкой стали с повышенным содержанием хрома (лх) в соответствии с ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П 1 -01.05М-0082, соответствует химическому составу стали марки 13ХФА.

Механические свойства материала корпуса задвижки соответствуют МУК ЕТТ №П1- 01.05М-0082.

Неметаллические включения металла корпуса задвижки преимущественно имеют округлую форму. Размер включений не превышает ~5 мкм. Неметаллические включения двухфазные, тёмная область включения представлена оксисульфидом алюминия, а светлая область представлена оксисульфидом марганца и кальция.

Микроструктура металла корпуса задвижки феррито-карбидная, соответствует термической обработке, включающей закалку и отпуск. Балл зерна соответствует 8 номеру по ГОСТ 5639.

Коррозионные свойства материала корпуса задвижки соответствуют требованиям Методических Указаний Компании «Единые технические требования. Задвижки клиновые для промышленных и технологических трубопроводов Компании №П1-01.05М-0082».

Скорость коррозии металла корпуса задвижки в сероводородсодержащей среде по методике ООО «Самарский ИТЦ» СТО №002-13 составила 0,20 мм/год, что соответствует требованиям ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082,

В металле корпуса задвижки трещины водородного растрескивания (ВР) при испытании по стандарту NACE TM0284 - отсутствуют, что соответ-

ствуется требованиям ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082.

Образцы металла корпуса задвижки *под нагрузкой* 72 % от минимального гарантированного предела текучести по ТУ 3741-001-22986183-2009 выдержали базовое время испытаний 720 часов, что **соответствует требованиям** ЕТТ ОАО «НК «Роснефть» №П1-01.05М-0082.

Выводы по испытаниям материала корпуса задвижки, сталь 09Г2С:

По химическому составу материал корпуса задвижки соответствует марке 09Г2С по ГОСТ 19281-89.

Анализ микроструктуры показал, что металл корпуса задвижки характеризуется **структурной неоднородностью**. Металл поверхностной области корпуса задвижки имеет структуру нормализованной стали, а именно феррито-перлитной структурой с пластинчатой формой цементита внутри перлитных зерен. Балл зерна соответствует 9 номеру по ГОСТ 5639. Металл центральной области корпуса задвижки преимущественно имеет структуру закаленной стали, которая представлена бейнитом (верхним и нижним) и некоторым количеством остаточного аустенита.

Анализ механических характеристик показал, что материал **полностью соответствует требованиям** ЕТТ ОАО «НК «Роснефть».

Стойкость, как к водородному растрескиванию, так и к СКРН у материала задвижки **крайне низкая**: при испытаниях на водородное растрескивание были обнаружены водородные трещины и блистеринг, при испытаниях на СКРН один из образцов разрушился. Обычно, для стали 09Г2С $\sigma_{th} = 0,6\sigma_{0,2}$.

3. Обсуждение результатов

3.1 Сравнение показателей 09Г2С и 13ХФА

На рисунке 3.1 представлено сравнение средних значений ударной вязкости образцов сталей 09Г2С и 13ХФА из запорной арматуры.

Как видно из графика, образцы стали 13ХФА показали почти вдвое большую ударную вязкость KCV, хотя немного уступили в показателях ударной вязкости KCU.

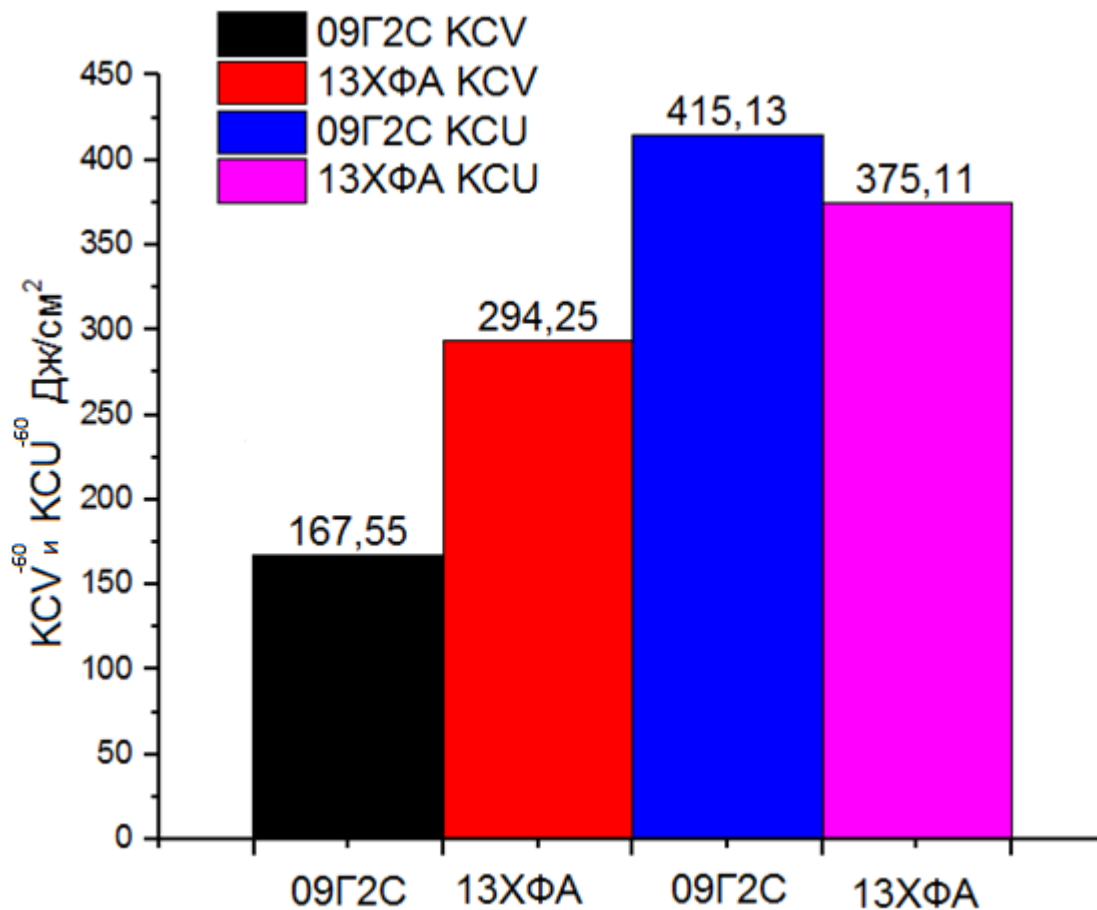


Рисунок 3.1 – Сравнение ударной вязкости 09Г2С и 13ХФА

Сравнение прочностных характеристик показано на рисунке 3.9. Пределы прочности 09Г2С и 13ХФА почти не отличаются, однако у 13ХФА значительно выше предел текучести.

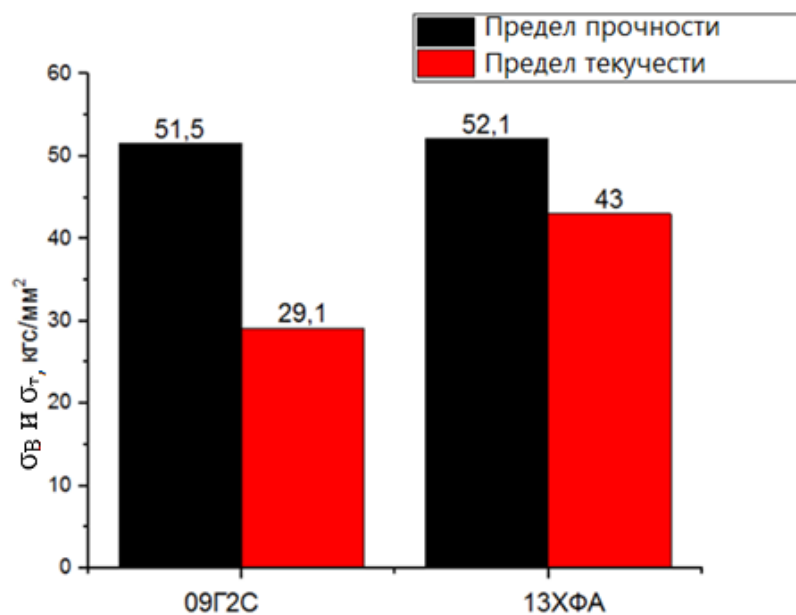


Рисунок 3.2 – Сравнение прочностных характеристик

Сравнение пластичности показано на рисунке 3.3. Пластичность обеих марок оказалась примерно на одном уровне.

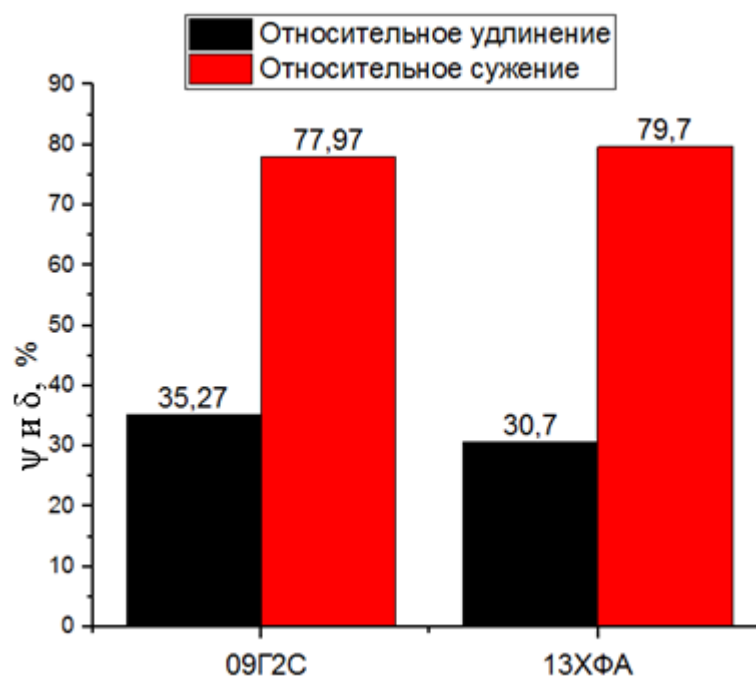


Рисунок 3.3 – Сравнение пластичности сталей 09Г2С и 13ХФА

При сравнении результатов на стойкость к водородному растрескиванию было выявлено, что 13ХФА после испытания не имеет ни водородных

трещин, ни блистеров на поверхности. Сталь 09Г2С показала значительно более низкую стойкость к водородному растрескиванию.

Испытания на СКРН показали, что один из образцов стали 09Г2С разрушился (время 384 ч.), у 13ХФА ни один из образцов не был разрушен. Следует также отметить, что на поверхности образцов 13ХФА образовалось гораздо меньше трещин.

3.2 Выводы

Результаты показывают, что по механическим характеристикам сталь 13ХФА не уступает и в некоторых случаях даже превосходит сталь 09Г2С. В частности, у нее значительно выше предел текучести и ударная вязкость по KCV. Более высокие значения ударной вязкости стали 13ХФА по сравнению со сталью 09Г2С отмечено и в литературных источниках [10].

Также сталь 13ХФА обладает большей стойкостью к водородному растрескиванию и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением. Большая стойкость к коррозии стали 13ХФА по отношению к 09Г2С подтверждается и литературными источниками [10].

Заключение

Сталь 13ХФА полностью соответствует требованиям, предъявляемым материалам для изготовления запорной арматуры, в частности задвижек клиновых для нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли. Более того, сталь 13ХФА проявляет себя лучше стали 09Г2С, которая является стандартным примером материала для запорной арматуры. Были выявлены следующие преимущества:

- Более высокий предел текучести
- Более высокая ударная вязкость KCV
- Более высокая стойкость к водородному растрескиванию
- Более высокая стойкость к СКРН

Все эти преимущества по совокупности делают ее перспективным материалом для запорной арматуры, особенно в условиях вредного воздействия водородосодержащих и серосодержащих сред.

Список использованной литературы

1. Сейнов С.В. Задвижки клиновые. Использование. Техническое обслуживание. Ремонт. – М.: Инструмент, 2006. – 144 с.
2. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. - Л.:Машиностроение, 1964 - 832 с.
3. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н. Справочник конструктора трубопроводной арматуры. - Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987.- 518 с.
4. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н., Вишнев Ю.Н. Арматура химических установок. - Л.: Химия, 1979 - 320 с.
5. Кашанский М.С. и др. Судовая арматура.- Л.: Судостроение, 1975 - 432 с.
6. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа, 2001.- 519 с.
7. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
8. Сейнов С.В. Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт. - М.: Машиностроение, 2002.- 392 с.
9. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением. Справочник под общей редакцией С.И.Косых. Л.: Машиностроение, 1982. -536 с.
10. Иоффе А.В., Ревякин В.А. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири. - Вектор науки ТГУ. № 4(14), 2010. – С 51-55.
11. Беликов С.В., Сергеева К.И. и др. Влияние температуры нагрева в межкритический интервал на формирование формирования субзеренной структуры в предварительно закаленных низколегированных сталях. - Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.
12. Мусихин С. А. Влияние исходной структуры и параметров отпуска на механические свойства стали 13ХФА // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов — молодых ученых. — Екатеринбург : УрФУ, 2011. — С. 215-216.

13. Выбойщик Л. М., Лучкин Р. С., Иоффе А. В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ НА УРОВНЕ СВАРИВАЕМОГО МЕТАЛЛА // Вектор науки ТГУ . 2010. №4. С.60-64.
14. Сергеева К. И. Процессы формирования структуры и комплекса свойств низколегированной трубной стали повышенной стойкости : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.01 / К. И. Сергеева ; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. — Екатеринбург : [б. и.], 2012. — 24 с. — Библиогр.: с. 22-24 (16 назв.).
15. Маковецкий А.Н., Мирзаев Д.А. РОЛЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ ИЗ МЕЖКРИТИЧЕСКОГО ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУР // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия . 2012. №39 (298). С.71-78.
16. Патент 2283362 Низколегированная сталь / Степанов А.А., Тетюева Т.В., Иоффе А.В. и др.: заявлено 10.09.2004; опубликовано 10.09.2006.
17. Иоффе А.В., Денисова Т.В., Тетюева Т.В. Коррозионно-механическое разрушение трубных сталей в процессе эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов – 2012.-№10.-С 22-28.
18. Денисова, Т.В. Коррозионная повреждаемость нефтепроводных труб из хром-молибденосодержащих сталей в условиях агрессивности добываемой среды / А.В. Иоффе, М.А. Выбойщик, Т.В. Денисова, Т.В. Тетюева // Металловедение и термическая обработка металлов – 2012.-№10.-С 29-33.
19. Денисова, Т.В. Повышение эксплуатационных свойств труб стали путем микролегирования и модифицирования / Т.В. Денисова, Т.В. Тетюева, А.А. Воронин // Электрометаллургия. 2004. №4. – С.40-44.
20. Денисова, Т.В. Коррозионная повреждаемость нефтепроводных труб из хром-молибденосодержащих сталей в условиях агрессивности добываемой среды / А.В. Иоффе, М.А. Выбойщик, Т.В. Денисова, Т.В. Тетюева // Актуальные проблемы прочности : сб. тез. 53 Междунар. науч. конф. – Витебск (Беларусь), 2012. – С.198.

21. Платонов С.Ю. Повышение качества сварных соединений при электродуговой сварке / С.Ю. Платонов, В.В. Масаков, Л.М. Выбойщик // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции с международным участием посвященной 90-летию А.Н. Резникова «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении». – Тольятти: ТГУ, 2005. – С.63-64.
22. Выбойщик Л.М. Механизм разрушения областей структурной неоднородности / Л.М. Выбойщик, Р.С. Лучкин, С.Ю. Платонов // Тезисы докладов XI международной конференции «Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах». – Тула: ТулГУ, 2007. – С.63.
23. Выбойщик Л.М. Механическое и коррозионное разрушение областей структурной неоднородности / Л.М. Выбойщик, Р.С. Лучкин, С.Ю. Платонов // Тезисы докладов IV Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». – Москва: МИСиС, 2008. – С.33.
24. Изучение влияния феррита, образованного при охлаждении из однофазной области и из МКИ, на ударную вязкость стали 13ХФА / С. В. Беликов, К. И. Сергеева, О. Ю. Корниенко [и др.] // XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых — металлургов. II Международная научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». — Екатеринбург, 2012. — С. 63-65.
25. Полякова А.М. Межкритическая закалка конструкционных сталей / А.М. Полякова, В.Д. Садовский // МиТОМ. 1970. №1. с. 5...8.
26. Васильева А.Г. Влияние исходной структуры и скорости нагрева на свойства стали после межкритической закалки / А.Г. Васильева, Т.В. Гуляева, В.Г. Сазонов // МиТОМ. 1981. №5. с. 52...56.
27. Коган Л.И. Влияние аустенитизации в межкритическом интервале температур на структуру свойства низкоуглеродистых сталей / Л.И. Коган, Э.Ф. Матрохина, Р.И. Энтин // ФММ. 1981. Т. 52. вып. 6. с. 1232...1241.
28. Голованенко С.А. Двухфазные низколегированные стали / С.А. Голова-

- ненко, Н.М. Фонштейн. М.: Металлургия, 1986. 207 с.
29. Сазонов Б.Г. Влияние вторичной закалки из межкритического интервала на склонность стали к обратимой отпускной хрупкости / Б.Г. Сазонов // МиТОМ. 1957. №4. с. 30...34.
30. Голованенко С.А. Двухфазные низколегированные стали / С.А. Голованенко, Н.М. Фонштейн. - М. : Металлургия, 1986. - 207 с.
31. Коган Л.И. Влияние аустенитизации в межкритическом интервале температур на структуру и свойства низкоуглеродистых сталей / Л.И. Коган, Э.Ф. Матрохина, Р.И. Энтин // ФММ. - 1981. - Т. 52. - Вып. 6. - С. 1232-1241.
32. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Р.И. Энтин, Л.М. Утевский. - М. : Наука, 1977. - 238 с.
33. Нассонова О.Ю. Повышение конструктивной прочности Cr-Mo-V сталей методами термической и термомеханической обработок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. – 16 с.
34. Полякова А.М. Межкритическая закалка конструкционных сталей / А.М. Полякова, В.Д. Садовский // МиТОМ. - 1970. - № 1. - С. 5-8.
35. Штремель М.А. Прочность сплавов. - М. : МИСИС, 1997. - Ч. II. - 527 с.
36. Velthuis S.G.E. A three-dimensional model for the development of the microstructure in steel during slow cooling / S.G.E. te Velthuis, N.H. van Dijk, M.Th. Rekvelde, J. Sietsma, S. van der Zwaag // Materials Science and Engineering A277 (2000) P. 218-228.
37. Gamsjäger E. Interface mobility in case of the austenite-to-ferrite phase transformation / E. Gamsjäger, M. Militzer, F. Fazeli, J. Svoboda, F.D. Fischer // Computational Material Science 37 (2006) P. 94-100
38. Li D.Z. Growth modes of individual ferrite grains in the austenite to ferrite transformation of low carbon steels / D.Z. Li, N.M. Xiao, Y.J. Lan, C.W. Zheng, Y.Y. Li // Acta Materialia 55 (2007) P. 6234-6249.
39. ГОСТ Р 52720-2007. Арматура трубопроводная. Термины и определения.
40. НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования.

41. ОТТ ТЭС-2000 (РД 153-34.1-39.504-00). Общие технические требования к арматуре ТЭС.
42. Предложения ЦКБА по изменению НП 068 - 05. ТПА Экспресс. 2011. №3 (03). С. 3-7.
43. ГОСТ 31294-2005. Клапаны предохранительные прямого действия. Общие технические условия.
44. ГОСТ 12893-2005. Клапаны регулирующие односедельные, двухседельные и клеточные. Общие технические условия.
45. ГОСТ 8032-84. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел.
46. ГОСТ 23866-87. Клапаны регулирующие односедельные, двухседельные и клеточные. Основные параметры.
47. ГОСТ 9544-2005. Арматура трубопроводная запорная. Классы и нормы герметичности затворов.
48. ГОСТ 5761-2005. Клапаны на номинальное давление не более PN 250. Общие технические условия.
49. В.Н.Ивановский, В.И.Дарищев, А.А.Сабиров, В.С.Каштанов, С.С.Пекин – Оборудование для добычи нефти и газа. М.: Из-во «Нефть и газ РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина», 2002
50. В.П.Грабович –Газопромысловое оборудование и машины. М.: «МИНХ и ГП им.И.М.Губкина» , 1977
51. Е.И. Бухаленко и др. Нефтепромысловое оборудование. Недра 1990г.
52. Е.И. Бухаленко – Монтаж, обслуживание и ремонт нефтепромыслового оборудования: учебник / Е.И. Бухаленко, Ю.Г. Абдуллаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 391 с.
53. Геллер Ю. А. Инструментальные стали, изд. 5- ое, М. Металлургия, 1983 г.
54. Гуляев А. П. Инструментальные стали, Справочное изд. 2 – ое М., Металлургия, 1975г.
55. Башта Т.М., Мендельсон Д.А., Огар П.М., Шифрин С.Н. Расчет утечек газа через затвор пневмоклапана / Эксплуатационная надежность планера и

- систем воздушных судов. Киев: КНИГА, 1981. - С. 85-93.
56. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Дайнеко А.А., Тарасов В.А. Трибомеханика высоконапряженных трибосопряжений деталей машин // Безопасность регионов — основа устойчивого развития: М-лы науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 2 Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2009.
57. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Контакт конусных затворов с начальным контактом по линии // Труды БрГУ-Т. 2. Братск: БрГУ.-2007.-С.125- 129.
58. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Многокритериальный подход к проектированию затворов трубопроводной арматуры // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИрГУПС. 2007, №3(15). — С. 6-10.
59. Ю.Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Особенности контакта конусных затворов с начальным касанием вдоль полосы // Труды БрГУ.Т.2.-Братск: БрГУ.-2007.С.121-125.
60. И.Белый В.А., Пинчук Л.С. Введение в материаловедение герметизирующих систем. Минск.: Наука и техника, 1980. - 304 с.
61. Беспалов К.И., Огар П.М., Ясысов В.В. Определение герметичности клапанных уплотнений с учетом образования зон износа // Вестник Львовского политехнического института. Львов: Высшая школа, 1985. № 190. - С. 5-7.
62. Волошин А.А., Григорьев Г.Г. Расчет и конструирование фланцевых соединений // Справочник. Л.: Машиностроение, 1979. - 125 с.
63. Воронин Н.А. Применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела /Н.А. Воронин // Трение и износ.-1993. Т. 14, №5, с. 250-258.
64. Вопросы истечения газов при низких давлениях // Экспресс. информ. Серия: Вакуумная техника. - 1975. - № 34. - С. 11-18.
65. Галахов М.А., Усов П.П. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения. — М.: Наука, 1990. 280 с.
66. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем. М.:

Машиностроение, 1977. - 120 с.

67. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. - 256 с.
68. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Теоретические основы метода расчета жесткости стыка шероховатых тел с учетом взаимного влияния микроконтактов // Машиноведение, 1979, №6. С. 66-71.
69. Гошко А.И. Исследование и расчет точности шаровых кранов, исходя из обеспечения качества агрегатов химических производств // Автореф.дис. канд.техн.наук. М., 1973. - 16 с.
70. Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Холодилов О.В. Методы анализа микрогеометрии поверхностей // Трение и износ. 1989. Т.10, №1. - С. 138-155.
71. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. -Л.: Машиностроение, 1969. 887 с.
72. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура // Справочное пособие.- Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
73. Куршин А.П. Пути повышения надежности и качества трубопроводной арматуры на основе научно-технических достижений в области герметологии // Арматуростроение, № 6(32),2004. С. 27-31.

Приложение А

На основе результатов испытаний стали 13ХФА из элементов пробной задвижки DN100 PN25, Лапиковым С.О. и при его непосредственном участии разработаны технические условия «Требования к основным деталям задвижки клиновой», взамен действующему ТУ 3741-001-22986183-2009 на ООО «Предприятие «Сенсор».