

На правах рукописи

ГАББАСОВ ДМИТРИЙ ФАНИСОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗМЕЕВИКА ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ  
ИЗ СТАЛИ 15Х5М С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ ПОЖАРА**

Специальности:

05.02.13 – "Машины, агрегаты и процессы";

(Машиностроение в нефтеперерабатывающей промышленности)

05.26.03 – "Пожарная и промышленная безопасность"

(нефтегазовая отрасль)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2004

Работа выполнена на кафедре «Технология нефтяного аппаратостроения» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Научный руководитель                      доктор технических наук, профессор  
Халимов Андались Гарифович.

Научный консультант                      кандидат технических наук, доцент  
Ларионов Валерий Иванович

Официальные оппоненты:                доктор технических наук, профессор  
Абдрахимов Юнир Рахимович;  
  
   доктор технических наук  
Абдуллин Рафиль Сайфуллович

Ведущая организация                      Муниципальный научно-технический центр  
«Безопасность эксплуатации сложных технических систем» (МНТЦ «БЭСТС»), г. Уфа.

Защита состоится "28" декабря 2004 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " ноября 2004 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В условиях все усложняющихся процессов нефтепереработки, связанных с растущими требованиями к качеству выпускаемой продукции и обеспечения безопасности процессов переработки, а также с учетом многообразия технологических процессов и их интенсификации, усложняются условия работы нефтегазохимического оборудования и расширяется номенклатура применяемых материалов. Значительное количество оборудования, особенно для осуществления высокотемпературных процессов переработки в сероводородных и окислительных серосодержащих средах, изготавливается из жаропрочных хромомолибденовых сталей. С позиции технологической и эксплуатационной прочности наиболее слабым звеном таких конструкций является образование зон повышенной твердости в материале различного происхождения.

Наиболее характерным объектом широкого применения хромомолибденовых сталей типа 15X5M служат змеевики трубчатых печей, которые наиболее теплонапряжены и относятся к ответственным конструкциям, работающим в очень жестких условиях. Они подвержены коррозионно-эрозионному износу, как по внутренней, так и по наружной поверхности труб.

В производственной практике нередко встречаются случаи отклонения от технологического режима эксплуатации нагревательных трубчатых печей, сопряженных со значительным перегревом труб, что неизбежно ведет к аварийным остановкам из-за изменения структурного состояния, соответственно механических свойств металла труб змеевиков, изготовленных из стали 15X5M, и их разрушению. В условиях производства очень важно быстро и качественно провести ремонтно-восстановительные работы с соблюдением всех действующих норм, которые нередко предполагают замену секций змеевиков, а это выливается в большие материальные затраты. Таким образом, необходима разработка научно обоснованных ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих надежное и быстрое восстановление

работоспособности змеевиков трубчатых печей, металл труб которых претерпел неблагоприятные структурные изменения вследствие вышеуказанных причин.

Работа посвящена решению проблемы восстановления работоспособности змеевика трубчатой печи блока подготовки сырья установки АВТМ-9 ОАО «НУНПЗ» после ее аварийной остановки. Из-за пожара внутри печи и его последующей ликвидации вся средняя часть труб радиантной и нижних рядов конвекционной секции печного змеевика охрупчилась, что делало невозможным ее дальнейшую эксплуатацию.

Единственно известный способ восстановления работоспособности змеевика нагревательной трубчатой печи большой протяженности предполагал его полную замену с выполнением сварочно-монтажных работ при весьма затруднительных условиях внутри печи. Это, помимо больших материальных затрат, требовало длительной остановки технологической установки. Кроме того, при сборке нового змеевика, согласно техническим условиям на изготовление, требуется выполнение сварки стыков однородными электродами Э-10Х5МФ марки ЦЛ-17, что вызывает необходимость проведения местной высокотемпературной термической обработки каждого стыка змеевика по режиму высокого отпуска.

**Цель работы** - разработка технологического процесса восстановления работоспособности змеевика трубчатой печи из жаропрочной стали 15Х5М с учетом последствий пожара.

### **Задачи исследований**

1. Анализ технологических методов обеспечения надежности нагревательных трубчатых печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.

2. Разработка технологического процесса ресурсосберегающей технологии термической обработки для восстановления работоспособности змеевика печи с учетом последствий пожара.

3. Исследование температурного поля при проведении объемной термической обработки крупногабаритного змеевика трубчатой печи.

4. Исследование механических свойств и структуры охрупченного при пожаре и восстановленного термообработкой металла труб и сварных соединений трубчатого змеевика печи.

5. Разработка методики экспресс диагностики при оценке технического состояния змеевика трубчатой печи.

### **Научная новизна**

1. Впервые научно обоснована возможность проведения объемной термической обработки крупногабаритного трубчатого змеевика из жаропрочной стали 15X5M без демонтажа нагревательной печи с нагревом от собственных горелок. При этом достигается восстановление работоспособного состояния, отвечающего требованиям промышленной безопасности, за счет снижения твердости до нормативных значений, образования равновесной структуры с повышенными прочностными и вязкопластическими свойствами.

2. На базе основных положений механики твердого деформируемого тела и выполненного анализа напряженного состояния выявлены закономерности формирования в твердых участках сварных соединений трубчатых печей из стали 15X5M специфических полей напряжений с пониженными значениями отношения шаровой к девиаторной части их тензора в сравнении с одноосным растяжением, которые описаны соответствующими расчетными формулами с учетом реальной механической неоднородностью.

### **Практическая ценность**

В отечественной практике нефтеперерабатывающих предприятий разработан и внедрен в производственных условиях ОАО «НУНПЗ» технологический процесс выполнения объемной термической обработки крупногабаритного змеевика из жаропрочной хромомолибденовой стали с нагревом от собственных горелок трубчатой печи. Внедренная технология позволила получить значительный технико-экономический эффект и сократить время проведения восстановительных ремонтных работ.

### **Апробация работы**

Основное содержание работы докладывалось и обсуждалось на Втором научно-техническом семинаре (Уфа, 1999), II Международном симпозиуме (Уфа, 2000), II Международной научно-технической конференции (Москва, 2001), III Конгрессе нефтепромышленников России «Проблема нефти и газа» (Уфа, 2001), 53-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2002), 6-й Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса» (Уфа, 2002).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано двенадцать печатных работ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 110 источников и приложений. Общий объем работы составляет 130 страниц машинописного текста, 38 рисунков, 9 таблиц и 3 приложения.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрывается актуальность выбранной темы диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены разновидности наиболее часто встречающихся повреждений и дефектов змеевиков трубчатых печей, закономерности их возникновения, способы их предотвращения и ликвидации, а также описаны конструктивные особенности нагревательной печи типа ГС-1 блока подготовки сырья установки АВТМ-9 ОАО «НУНПЗ» и причины ее аварийной остановки (рис.1).

Длина печи составляет почти 16 м, ширина около 6 м и высота 15,5 м. В подду камеры радиации установлены 10 горелок. Продуктовый змеевик печи изготовлен из стали 15Х5М и состоит из двух потоков (южный и северный экраны) по 23 ряда труб радиантной секции и 15 рядов труб конвекционной секции, расположенной над камерой радиации. При аварийном возгорании и тушении пожара в данной печи уста-

новки депарафинизации масел произошло значительное охрупчивание металла труб. Выполненные контрольные замеры твердости показали недопустимо завышенные их значения до 360-410 единиц по Бринеллю для металлов труб и сварных стыков на прямых участках в средней части на длине до 8-10 м обеих секций радиантной камеры и части труб 3-х нижних рядов конвекционной секции змеевика печи. Общая протяженность труб из жаропрочной стали марки 15X5М диаметром  $\text{Ø}219 \times 10$  и  $\text{Ø}273 \times 10$  мм, требующих замены, составляла 1,7 км.

Изложена область применения жаропрочной хромомолибденовой стали 15X5М, на основе известных научных публикаций В.Н. Земзина, И.Р. Кузеева, Н.М. Королева, Н.В. Кирилличева, П.М. Королькова, Л.С. Лившица, А.Г. Халимова, Р.З. Шрона объясняется механизм охрупчивания и возможных структурных изменений в сталях данного класса под действием ряда факторов, приводящих к невозможности дальнейшей безопасной эксплуатации змеевика нагревательной печи.

На основе работ ученых ведущих институтов РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ВНИИНефтемаша, НИИХиммаша и других дана оценка возможности возникновения напряжений и деформаций при высокотемпературных процессах. Приведен анализ способов предупреждения охрупчивания металла змеевика из жаропрочных хромомолибденовых сталей мартенситного класса и обеспечения их работоспособного состояния при изготовлении, эксплуатации и ремонте. Рассмотрены наиболее возможные варианты восстановления работоспособного состояния змеевика трубчатой печи, начиная с наиболее очевидного – демонтажа змеевика с полной или частичной заменой труб. Для ликвидации закалочных структур и отрицательного воздействия твердых охрупченных участков металла труб необходимо проведение высокотемпературной термической обработки (ТО), обеспечивающей образование перлитной структуры. ТО заключается в длительном высокотемпературном нагреве и может выполняться как местная ТО с помощью переносных нагревателей, так и полная объемная всего изделия в стационарной печи. Местная ТО удлиняет производственный цикл, ухудшает условия производства, вы-

зывает дополнительные затраты и увеличение трудоемкости, поэтому для восстановления работоспособности продуктового змеевика рациональнее проводить полную термическую обработку.

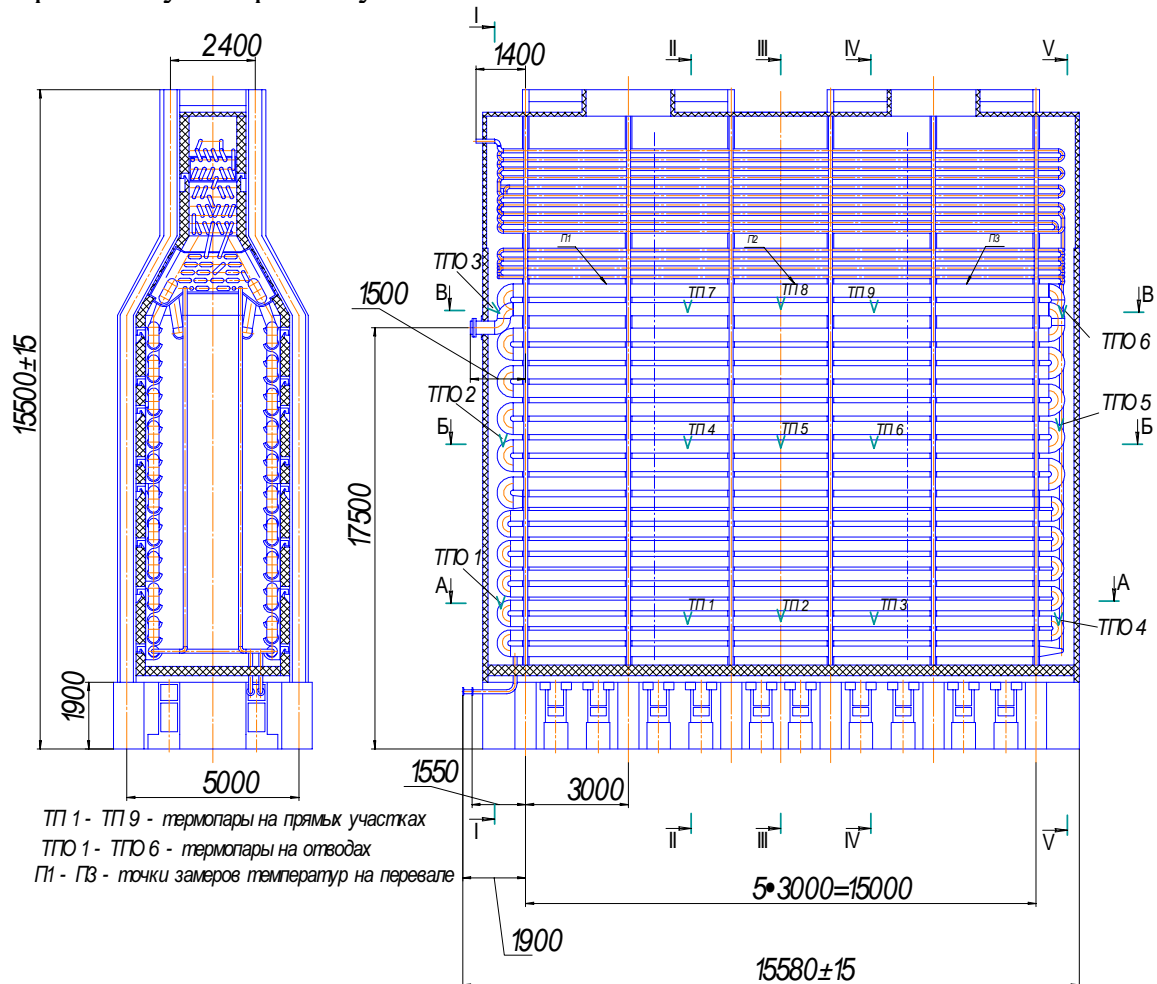


Рис. 1. Общий вид нагревательной печи блока подготовки сырья установки АВТМ-9

В заключении главы сделаны выводы о целесообразности и актуальности темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** проведен анализ влияния режимов различных способов термообработки на свойства сталей данного класса. Рассмотрены преимущества и недостатки местной и объемной термообработки, а также их применимость для достижения поставленной цели работы. В частности, в работе выполнены экспериментальные исследования с применением местной и объемной восстанавливающей термической обработки (ТО) по различным режимам. По результатам проведенных лабораторных исследований механических свойств и структуры металла различных

участков основного металла и сварных соединений был сделан вывод о нецелесообразности применения местной термообработки, применительно к крупногабаритным сварным конструкциям. Необходимо отметить следующие недостатки проведения местной ТО:

1) относительно низкие механические свойства восстановленного металла, вследствие появления широких участков разупрочнения с пониженной твердостью в зонах нагрева (рис.2);

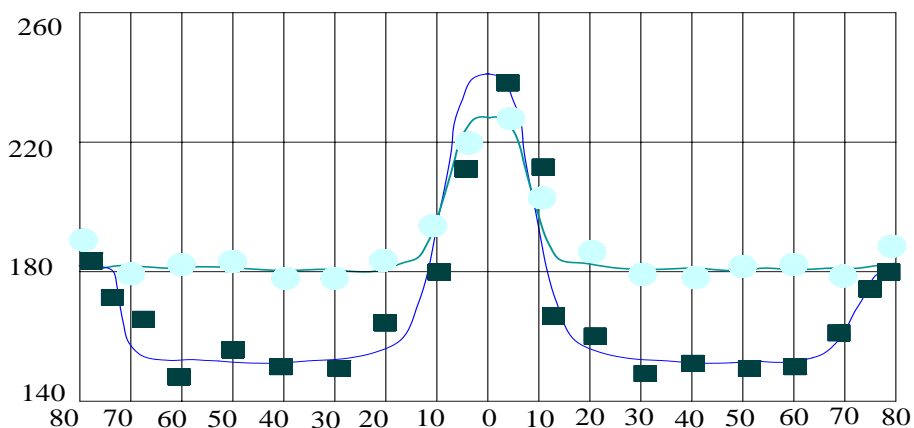


Рис. 2. Твердость в поперечных сечениях сварного шва при различных видах ТО трубных узлов змеевика печи из стали 15Х5М: ■ - восстановление свойств местным высоким отпуском многопламенной газовой горелкой; ● - восстановление свойств высоким отпуском в печи

- 2) из-за локальности нагрева и направленности отвода тепла наблюдается образование менее равновесной структуры в металле шва и околошовной зоне;
- 3) трудоемкость и энергоемкость процесса, а также, учитывая

значительную протяженность закаленных участков змеевика печи, большая продолжительность выполняемых восстановительных работ по времени;

4) сложность выполнения процесса, требующего наличия дорогостоящего оборудования.

Замеры твердости по периметру катушки, вырезанной из трубы №8 южного экрана камеры радиации наиболее охрупченного участка змеевика, показали, что твердость поверхности труб со стороны факела на 40÷50НВ больше, чем со стороны стены. Это является еще одной предпосылкой к применению объемной термообработки.

При анализе опыта ученых В.Н. Земзина, Р.З. Шрона, Н.М. Королева, Н.В. Кирилличева, П.М. Королькова и других в области применения термической обработки был сделан вывод, что наиболее рациональным видом термической обработки змеевика печи блока подготовки установки АВТМ-9, изготовленного из жаропрочной закаливающейся хромомолибденовой стали 15Х5М, является выполнение полной объемной термической обработки. Вызывает интерес технология, включающая в себя закалку с нагревом выше верхней критической точки полиморфного превращения ( $A_{c3}$ ) с интенсивным охлаждением водой и дальнейший высокотемпературный отпуск (рис.3). Такое сочетание видов и режимов термообработки рассматривалось применительно к создавшейся ситуации, исходя из влияния их на изменение свойств металла, как в отдельности, так и при их совместном действии. Так, при одних и тех же температурах нагрева при увеличении времени выдержки твердость сначала уменьшается, а затем резко возрастает. Аналогично при постоянном времени выдержки, меняя температуру нагрева, можно изменять свойства хромомолибденовой стали в широких пределах, что было показано на натуральных образцах (рис.4).

Необходимо отметить следующие основные особенности проведения предлагаемой ресурсосберегающей технологии:

1) первый этап проведения полной термообработки по режиму закалки был осуществлен в процессе тушения пожара, поэтому о возможных режимах ее выполнения (температуре нагрева, выдержке, скоростях нагрева и охлаждения) можно судить лишь косвенно после визуального и измерительного контроля объекта и проведения комплексных лабораторных исследований структуры и свойств металла. При внешнем осмотре наружной поверхности труб змеевика локальных изменений формы в виде отдулин, провисания труб вследствие перегрева и отклонений от геометрической формы, превышающих допустимые нормы не обнаружено. Для определения механизма и условий охрупчивания образцы из стали 15Х5М подвергались закалке в лабораторных условиях с последующим замером твердости и изучением микроструктуры. Вследствие этого было установлено, что максимальная температу-

ра нагрева металла труб змеевика при пожаре, вероятно, достигала не более  $950 \div 1000^\circ\text{C}$  (область I на рис.3);

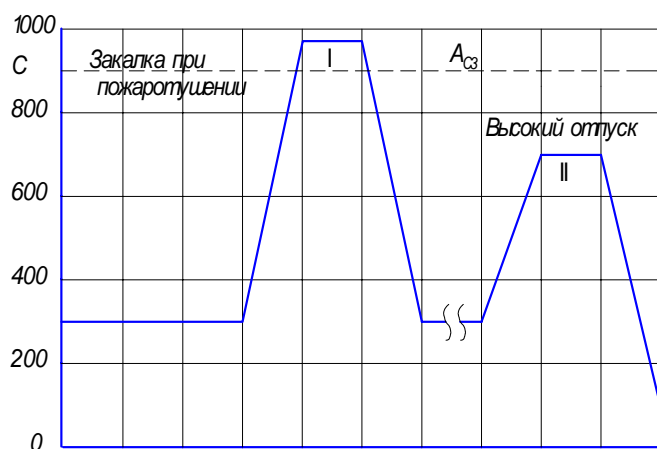


Рис. 3. График полной термообработки змеевика трубчатой печи:

I – закалка при пожаротушении, II – высокий отпуск

2) второй этап полной термообработки по режиму высокого отпуска должен проводиться по технологии, учитывающей состояние охрупченности металла змеевика и сварных соединений после проведения закалки, наличие в ней возможных мест концентраций напряжений (в виде развивающихся дефектов, с оценкой степени их опасности существующими методами технического диагностирования);

3) необходимо также учитывать уникальность проводимой операции с точки зрения крупногабаритности термообрабатываемой конструкции и обеспечения равномерности нагрева по всем зонам змеевика, так как значительный перепад температур по объему печи может привести к возникновению новых напряжений и изменению геометрических размеров змеевика или его разрушению;

4) при выборе режимов проводимого высокого отпуска в печи необходимо также учесть различие свойств средней закаленной части с повышенной твердостью и нормальной твердости по концам труб змеевика, а также наличие там монтажных стыков, выполненных аустенитными электродами, нагрев которых выше температуры  $550^\circ\text{C}$  приведет к неблагоприятным структурным изменениям в зоне сплавления с аустенитным швом.

Выбор оптимального режима термической обработки сварных конструкций весьма сложен и требует одновременного учета изменения ряда свойств сварных соединений и основного металла, а также влияния на надежность изделия уровня оста-

точных напряжений. С повышением легирования и прочности стали этот выбор становится все более трудным. Поэтому если для сварных соединений малоуглеродистых сталей ограничиваются обычно лишь знанием степени снятия сварочных напряжений и изменения ударной вязкости и твердости разных зон в результате проведения отпуска, то для соединений среднелегированных хромомолибденовых сталей номенклатура регулируемых термической обработкой свойств, оказывающих решающее значение на надежность конструкций, заметно расширяется.

Согласно РТМ26-44-82 для сталей типа 15X5M, высокий отпуск рекомендуется проводить при температуре нагрева до 730-780°C.

При выборе скоростей нагрева учитывалась повышенная опасность образования трещин в интервале температур 550-680°C для сварных конструкций из хромомолибденовых сталей.

Длительность выдержки при температуре отпуска обеспечивает равномерный прогрев всего крупногабаритного змеевика трубчатой печи и полноту протекания релаксационных процессов и структурных превращений в закаленных участках.

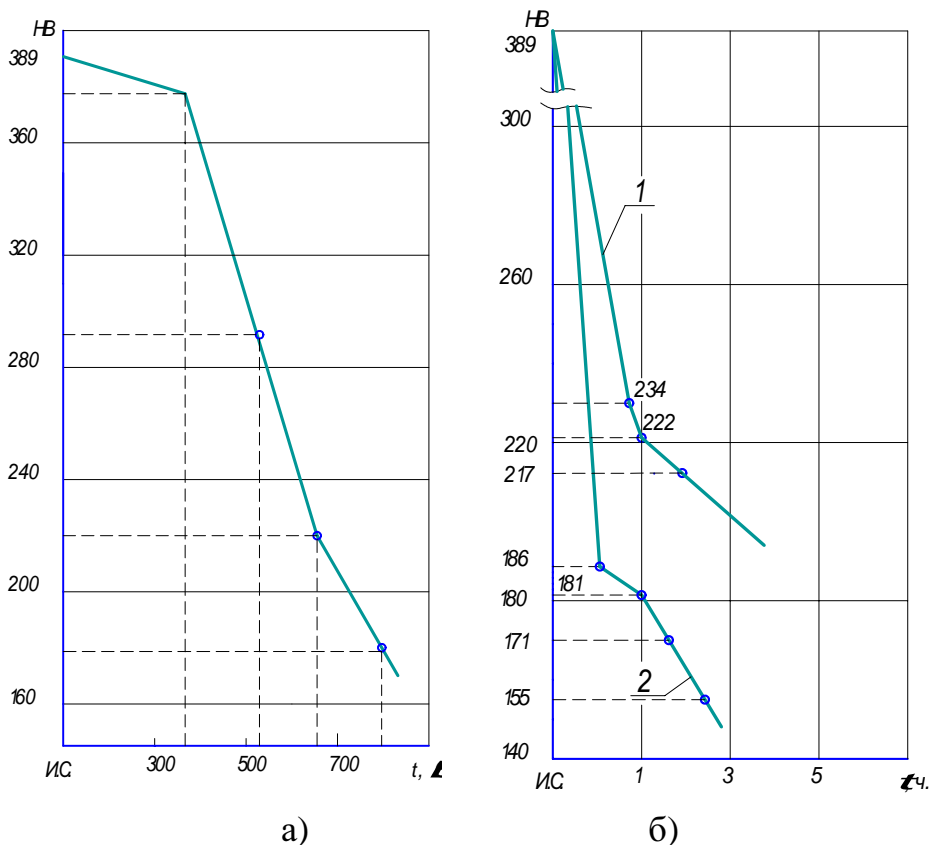


Рис. 4. Зависимости изменения твердости стали 15X5M от температуры (а) и времени выдержки (б) при отпуске: 1 – нагрев до температуры 650 °С; 2 - нагрев до температуры 740 °С

В целях оптимизации режима высокого отпуска в лабораторных условиях образцы, вырезанные из наиболее охрупченной средней части труб змеевика печи, подвергались термообработке при различных температурах нагрева при отпуске.

Первые образцы нагревались до температуры 740°C со скоростью 30-50°C/ч. Время выдержки изменялось для них от 0,5 до 2 часов. Восстановление свойств металла с завышенной твердостью происходит уже при выдержке в 30 минут. Твердость металла с исходной твердостью 360-410 единиц при этом снижается на 150-160 единиц по Бринеллю.

Степень снижения твердости при дальнейшем увеличении продолжительности выдержки падает (линия 2, рис.4, б): при выдержке 1 час значение твердости уменьшается по сравнению с исходным на 160-165 НВ, при выдержке 2 часа – на 180 НВ. По графику видно, что имеет место высокая степень снижения твердости, что может привести к заниженным значениям твердости при термической обработке. Следовательно, появляется возможность понижения температуры нагрева при высоком отпуске.

По мере понижения максимальной температуры нагрева установлено, что требуемая степень восстановления свойств охрупченного металла достигает своего регламентируемого уровня при 650 °С (рис. 4, а). Так же, как и в первом случае (для 740°C), менялось время выдержки образцов. Оказалось, что необходимый результат по твердости получается уже при выдержке всего в 40 минут (линия 1, рис.4, б). При дальнейшем увеличении выдержки (более 1 часа) степень снижения твердости закаленного металла существенно возрастает, что приведет к снижению прочности восстанавливаемых труб змеевика.

Уменьшение температуры нагрева на 50-80°C от регламентируемой и времени выдержки в 1,5-2 раза можно объяснить большой концентрацией термических и структурных напряжений и неравновесностью закаленного металла, стремящегося при отпуске к компенсации напряжений и получению более равновесной структуры. Отмеченный факт требует специального изучения и научного обоснования.

На основе анализа результатов проведенных исследований с целью оптимизации режимов термической обработки предложена технология, предусматривающая проведение объемной термообработки продуктового змеевика по режиму высокого отпуска за счет обогрева от собственных горелок печи с обязательным выполнением рекомендуемых специальных технологических мероприятий.

Термическую обработку необходимо выполнить по режиму:

1. Равномерный нагрев труб радиантных и конвекционной секции продуктового змеевика печи до температуры:

– 650-680°C прямых участков труб на длине до 8-10 метров, имеющих завышенную величину твердости; для этого горелки с четвертой по седьмую (отсчет ведется с западной стороны) должны работать в максимальном режиме нагрева;

– 500-530°C в области сварных стыков продуктового змеевика соединенных калачами и на прямых участках, выполненных аустенитными электродами марки ОЗЛ-6; в этих целях горелки с первой по третью и с восьмой по десятую должны работать на пониженном режиме горения и на зоны этих стыков шириной не менее 1500 мм необходимо накладывать тепловую асбестовую изоляцию.

2. Выдержка при указанных температурах составила 60 минут.

Хотя при термообработке образцов в лабораторных условиях восстановление свойств сварного шва и основного металла наблюдалось при выдержке всего 30 минут и дальнейшее увеличение времени выдержки существенно не влияло на результаты, учитывая большие размеры змеевика, при проведении объемной термообработки в печи было увеличено время выдержки при максимальной температуре отпуска до 60 минут. Здесь возникает проблема осуществления, поддержания и регулирования температурного режима при помощи форсунок печи. Поэтому перед проведением термической обработки змеевика в печи было предложено провести замену газовых горелок печи на более совершенной конструкции.

3. Скорость нагрева не должна превышать 50°C в час.

4. Медленное охлаждение (при уменьшающемся горении топлива в форсунках) до 300°C со скоростью охлаждения не более 100°C в час.

На рис. 5 приведены сравнительные данные по оптимальным режимам термической обработки для отдельных участков змеевика печи.

Контроль температуры при термической обработке осуществлялся термоэлектрическими преобразователями (термопарами) с самопишущими приборами. Наиболее приемлемы хромель-алюмелевые термопары (ТХА) и термоэлектродные провода экранированные или в оплетке из стальной проволоки марок ПТП-9, ПТПЭ и ПТВП.

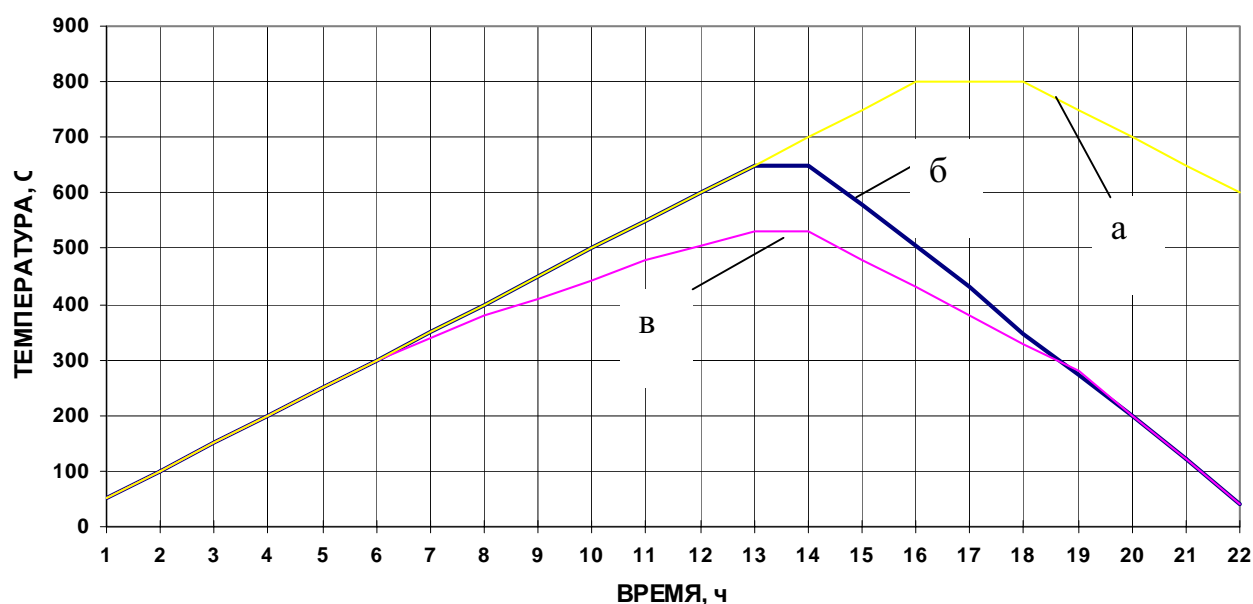


Рис. 5. Режимы проведения объемной термической обработки змеевика трубчатой печи по режиму высокого отпуска:

а) регламентируемый в нормативных документах; б) прямых участков закаленных труб с твердостью 360-410 НВ; в) участки крутоизогнутых калачей с твердостью ниже 200 НВ

Для регистрации температуры использовались потенциометры марок КСП-2, КСП-3 и КСП-4.

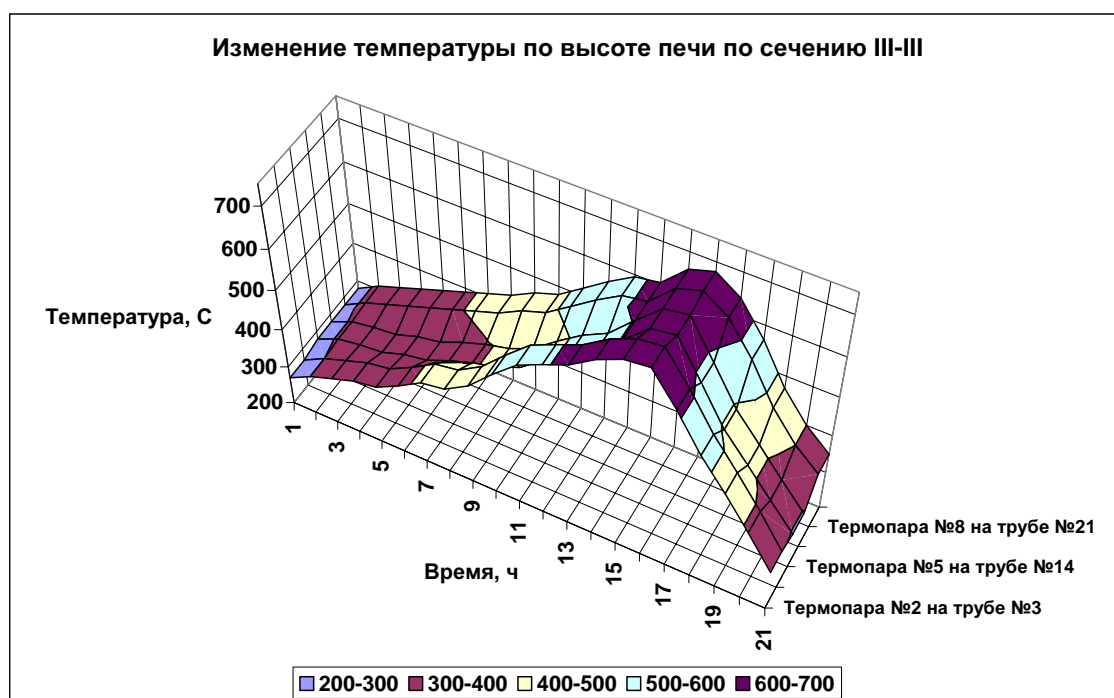
Количество термопар устанавливалось из условия надежности контроля температуры по всей термообрабатываемой поверхности труб продуктового змеевика, но не менее 3-х в каждой зоне повышенной твердости. Размещение термопар производилось на трубах № 3, 14 и 21 радиантной секции южного и северного экранов

(одну в середине между 3-й и 4-й трубными решетками и две по краям зон повышенной твердости труб). Контролировались также температуры в зоне стыков гнутых калачей и на выходе дымовых газов из камеры конвекции в дымовую трубу (на перевале – П1, П2, П3).

Расположение термопар по объему печи показано на рис.1.

Результаты контроля температур в процессе термической обработки по отдельным зонам печи для каждой точки замера обрабатывались с помощью программного обеспечения "Microsoft Excel", и был выполнен анализ изменения температурного поля с течением времени по отдельным зонам. После объединения этих данных стала видна полная картина распределения температур по всему объему печи. Результаты анализа выборочно приведены на рис. 6.

Как видно из графиков, распределение температурного поля во времени по всему объему печи имеет относительно равномерный характер. Необходимо отметить небольшой перепад температур (запаздывание по времени) в верхней и нижней части печи по отношению к ее среднему уровню. Этот перепад составляет 20-40°C и объясняется конструкцией печи. Перепад температур по длине печи находится в пределах, установленных разработанной технологией термической обработки.



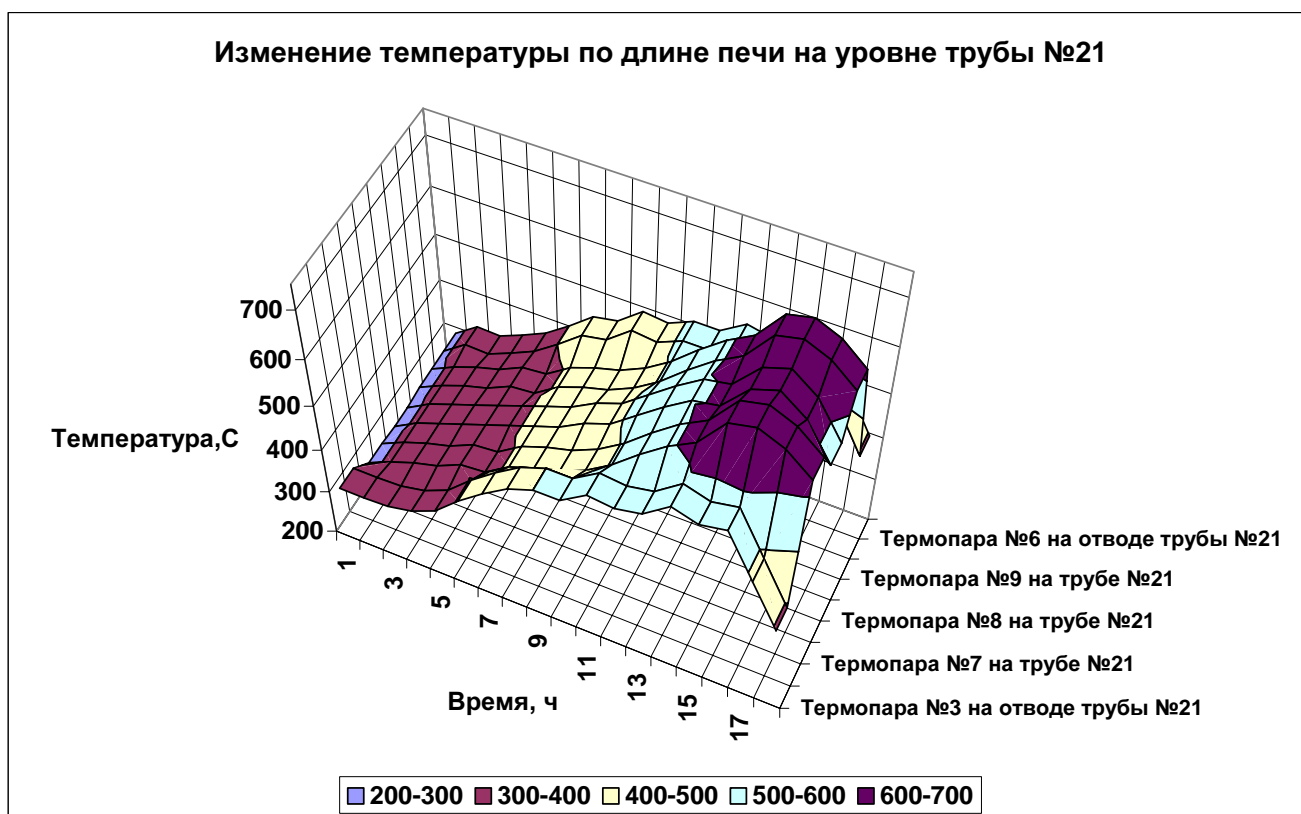


Рис. 6. Анализ теплообмена по всему объему печи

**Третья глава** посвящена исследованию свойств основного металла и сварных соединений змеевика трубчатой печи до и после проведения термической обработки.

Исследования механических свойств металла образцов печной трубы  $\varnothing 219 \times 10$  мм радиантной камеры показали, что основной металл труб и сварные стыки имеют весьма заниженные пластические свойства. Хотя угол загиба сварных соединений соответствует нормативным требованиям (образцы загибались без образования трещин выше 50 градусов), их относительные удлинения не превышают 3,3 - 4,1% и сужения 1,9%. При металлографических исследованиях, ультразвуковой и гамма-дефектоскопии сварных стыков выявлены трещиноподобные дефекты типа подрезов и непроваров вдоль и в корне шва в допустимых пределах.

Часть образцов, вырезанных из охрупченных участков трубчатого змеевика без термической обработки показали очень низкие вязкопластические свойства по относительному удлинению и сужению. Последнее можно объяснить образованием закалочных структур вследствие резкого охлаждения при пожаротушении. Наиболее

опасными с этой точки зрения являются сварные соединения, которые находятся в сложнапряженном состоянии из-за наличия в них твердых участков (твердых прослоек), насыщенных различными дефектами и склонных к повреждениям в процессе эксплуатации. С этой точки зрения, надежность безопасной эксплуатации трубчатого змеевика, выполненного из стали 15X5M, в первую очередь определяется напряженно-деформированным состоянием сварных соединений.

В диссертации разработаны теоретические предпосылки для прогнозирования допустимых параметров хрупких твердых прослоек в сварном соединении.

Особенностью напряженно-деформированного состояния твердых прослоек является реализация в них эффекта контактного разупрочнения, заключающегося в возникновении благоприятной «мягкой» схемы напряженного состояния и приводящей к улучшению деформационных характеристик сварного соединения (удлинения, сужения, трещиностойкости и др.). Базируясь на установленных закономерностях распределения касательных напряжений на контактной плоскости твердой прослойки, при которой ее металл полностью перейдет в пластическое состояние, получены уточненные формулы для оценки напряженного состояния полей твердых прослоек.

Распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$  от свойств и размеров представлено в следующем виде:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_B^{OM}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(K_B^c - 1)}{K_B^c} \cdot \frac{\eta}{\chi_T}, \quad (1)$$

где  $\sigma_B^{OM}$  – предел прочности основного (мягкого) металла;

$K_B$  – отношение предела текучести твердой прослойки к пределу прочности основного металла ( $K_B = \sigma_T^T / \sigma_B^{OM}$ );

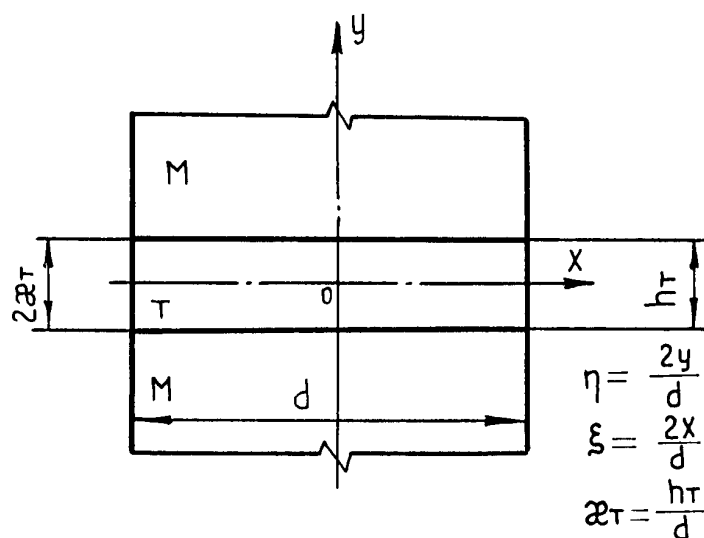


Рис. 7. Схема сварного соединения с твердой прослойкой

$\chi_T = h_T/d$  – относительная ширина твердой прослойки;

$\eta$  – относительная координата (рис.7);

$c$  – константа.

Значение относительной критической толщины твердой прослойки (рис.9), при которой она полностью будет вовлечена в пластическую деформацию, определяется

$$\chi_{m}^{kp} = \frac{(K_g^c - 1)}{4(K_g^c - 1)K_g^c}, \quad (2)$$

на основании экспериментов  $c \approx 1,0$ .

Кружочки на рис. 8 соответствуют экспериментальным значениям  $\chi_T^{kp}$ , полученным методом муаровых полос. Треугольниками (для пластин) и квадратами (для сосудов) отмечены значения критической толщины твердых прослоек, полученные непосредственно замером остаточных деформаций в твердых прослойках натуральных сварных соединений из стали 15X5M.

Таким образом, несмотря на то, что номинальные напряжения в сварном со-

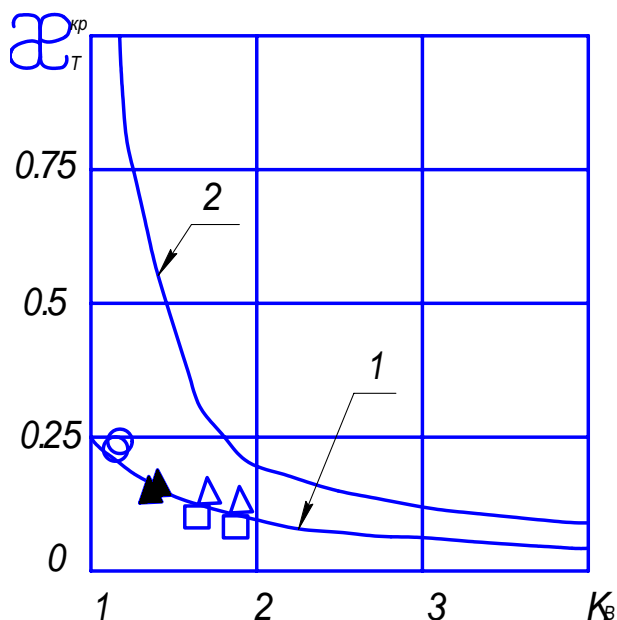


Рис. 8. Зависимости критической относительной толщины твердой прослойки  $\chi_T^{kp}$  от коэффициента механической неоднородности  $K_B$ : 1- значения по формуле (2); 2- по А.А. Шатову.

единении меньше предела текучести твердого металла, прослойка полностью вовлекается в пластическую деформацию. В связи с этим трещиностойкость твердой прослойки может быть выше, чем образца, изготовленного из металла с такими же исходными свойствами. Кроме того, уменьшение объема закаленного металла снижает вероятность возникновения технологических трещин, уменьшаются их размеры и область распространения.

Чем шире зона мартенситных превращений, тем больше и объемы металлов, подверженных термомеханическим из-

менениям при сварке, следовательно, тем выше и суммарные напряжения структурно неравновесного состояния в этих участках.

Сужение закалочных участков приводит к уменьшению суммарных внутренних напряжений (свободной энергии) в зонах сварного соединения.

После проведения процесса термической обработки продуктового змеевика печи выполнено повторное обследование технического состояния печи.

Проведены внешний визуальный осмотр и ревизия труб змеевика, крепежа, футеровки и металлоконструкций печи. Видимых дефектов не обнаружено. Замерена твердость металла труб, калачей, сварных соединений и основного металла всех труб радиантной секции и труб 1 и 2 ряда конвекционной секции. Значения твердости находятся в допустимых нормативных пределах.

Проведена выборочная ультразвуковая и радиационная дефектоскопия сварных соединений. Недопустимых дефектов не обнаружено. Замерены толщины стенок труб и калачей. Скорость коррозии элементов змеевиков не превышает 0,1мм/год.

Выполнена вырезка участков труб радиантной секции со сварным стыком для оценки физико-механических свойств, металлографических исследований и восстановления свойств после термической обработки. Прочностные и вязкопластические свойства металла труб и сварных соединений находятся в пределах нормативных требований.

Результаты проведенного обследования технического состояния футеровки, металлоконструкции и труб змеевиков, исследования свойств металла и сварных соединений, расчеты на прочность и гидравлическое испытание змеевика позволили продлить срок безопасной эксплуатации нагревательной печи.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению основных вопросов оценки технического состояния змеевиков трубчатых печей с использованием традиционных методов неразрушающего контроля и с помощью экспресс-метода магнитной памяти металла.

Основные физические эффекты, сопровождающие механизм разрушения металла: механические, тепловые, ультразвуковые, магнитные, электрические и электромагнитные. Отсюда следует, что, используя один или одновременно несколько параметров контроля, отображающих перечисленные эффекты, представляется возможность наиболее объективно оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта контроля.

Метод магнитной памяти металла представляет принципиально новое направление в технической диагностике. Это второй после акустической эмиссии (АЭ) пассивный метод, при котором используется информация излучения конструкций. При этом ММП, кроме раннего обнаружения развивающегося дефекта, дополнительно дает информацию о фактическом напряженно-деформированном состоянии объекта контроля и выявляет причину образования зоны концентрации напряжений - источника развития повреждения.

Основные принципы и критерии ММП изложены в отдельных работах Дубова А.А. и других.

Для количественной оценки уровня концентрации напряжений определяется градиент (интенсивность изменения) нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_p$  при переходе через линию КН (линию  $H_p=0$ ).

В соответствии с предложенным методом контроля магнитной памяти места, характеризующиеся сменой знака поля  $H_p$  или с нулевым значением этого поля, являются наиболее опасными местами, где концентрации напряжений от действующих нагрузок (изгибающих, крутящих и т.п.) могут достигать критического значения. Следовательно, в этих местах контролируемых сварных стыков могут иметь место различные дефекты и повреждения технологического и эксплуатационного характера.

С помощью данного метода было проведено обследование змеевика трубчатой печи: камера радиации – в объеме 100% и в доступных местах камеры конвекции.

Обнаруженные зоны концентрации напряжений в сварных стыках изображены на рис. 10.

Для идентификации повреждений в наиболее напряженных участках сварных соединений был проведен их контроль другими неразрушающими методами. В этих стыках были обнаружены скопления пор и подрезы в корне шва в допустимых пределах.

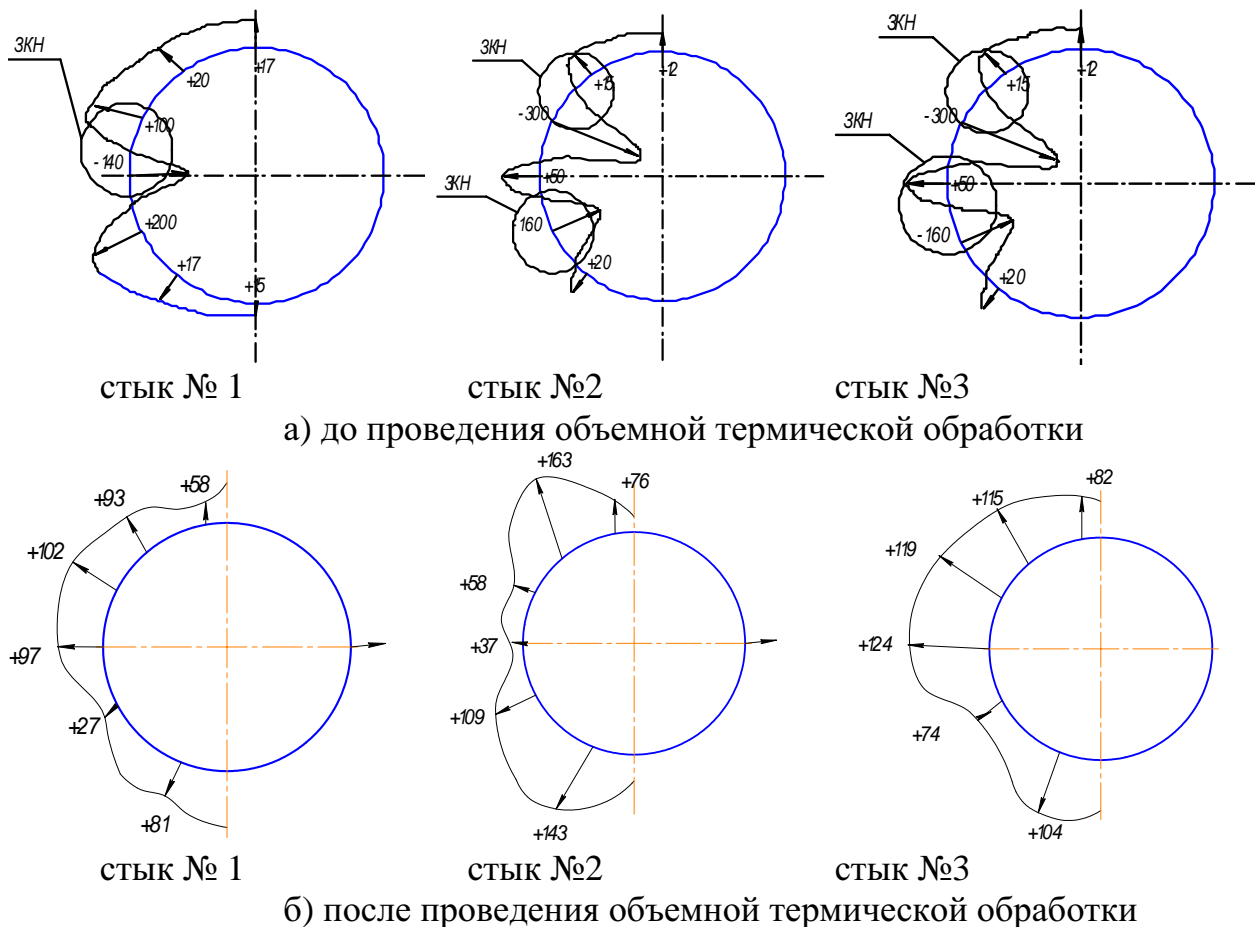


Рис. 9. Результаты контроля отдельных стыков змеевика трубчатой печи:

ЗКН – зоны концентрации напряжений

Как видно по эпюрам (рис. 9), зоны концентрации напряжений после проведения термической обработки отсутствуют. Это является еще одним ярким подтверждением положительного влияния проведенной термической обработки по выбранному технологическому режиму на сварные соединения.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана технология восстановления работоспособности охрупченных участков трубчатого змеевика из жаропрочной закаливающейся стали 15X5M.

Установлено, что при пожаротушении температура нагрева охрупченных участков труб змеевика соответствовала области верхних критических температур.

Показана возможность восстановления работоспособности крупногабаритного продуктового трубчатого змеевика нагревательной печи в производственных условиях нефтеперерабатывающего завода без демонтажа.

2. Разработана технология термической обработки трубчатого змеевика из стали 15X5M после температурного воздействия пожара. Высокий отпуск предусматривает нагрев при температуре 650-680°C для закаленных участков труб и 500-550°C для участков с аустенитнитными швами.

3. На базе основных положений механики твердого деформируемого тела и выполненного анализа напряженного состояния выявлены закономерности формирования в твердых участках сварных соединений трубчатых печей из стали 15X5M специфических полей напряжений с пониженными значениями отношения шаровой к девиаторной части их тензора в сравнении с одноосным растяжением, которые описаны соответствующими расчетными формулами.

4. Впервые в отечественной практике нефтеперерабатывающих предприятий разработан технологический процесс, внедренный в производственных условиях ОАО «НУНПЗ», выполнения объемной термической обработки крупногабаритного змеевика нагревательной трубчатой печи из жаропрочной хромомолибденовой стали с нагревом от собственных горелок со значительным технико-экономическим эффектом.

5. Полученные после термической обработки механические свойства основного металла и сварных соединений обеспечивают возможность безопасной эксплуатации трубчатой печи. При этом твердость закаленных участков труб снижается до нормативных значений и происходит образование равновесной структуры металла с повышенными прочностными и вязкопластическими свойствами.

6. Предложено для раннего выявления дефектов змеевика нагревательной трубчатой печи использование экспресс-метода диагностики, основанного на магнитной памяти металла. Данный метод был включен в методику оценки технического состояния и определения срока эксплуатации трубчатых печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, утвержденную АООТ "ВНИИнефтемаш".

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Халимов А.Г., Хусаинов З.М., Габбасов Д.Ф., Шарафиев М.Р., Исмагилов М.А., Якубенко Ю.А. Обеспечение безопасности эксплуатации трубчатых печей // Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы Второго научно-технического семинара / Редкол.: В.Я. Кершенбаум и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. - С.159-161.

2. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф., Якубенко Ю.А., Халимов А.А. Проблемы обеспечения надежности трубчатых печей нефтепереработки // Обеспечение работо-

способности нефтяной аппаратуры и трубопроводов: Сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГНТУ, Техинком 2000. - С.117-126.

3. Халимов А.Г., Халимов А.А., Габбасов Д.Ф., Зайнуллин Р.С. и др. Методика оценки технического состояния и определения срока эксплуатации трубчатых печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. - М.: Изд-во АО ОТ "ВНИИнефтемаш", 2000. - 14 с.

4. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф. Восстановление механических свойств металла труб змеевика печи проведением объемной термообработки // В кн.: Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Междунар. симпозиума. - Уфа, 2000. - С.178-180.

5. Габбасов Д.Ф., Халимов А.Г., Хисматуллин А.Р., Мустафин У.М. Использование метода магнитной памяти металла при диагностировании трубчатых печей и газопровода // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. - М.: 2001. - С.212-213.

6. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф., Хисматуллин А.Р., Фаизов И.Ф. Анализ результатов термообработки змеевика печи // Проблема нефти и газа: Тез. докл. III Конгресса нефтепромышленников России. - Уфа: Реактив, 2001. – С. 320.

7. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф., Хисматуллин А.Р., Фаизов И.Ф. Особенности диагностирования надземных переходов газопровода // Проблема нефти и газа: Тез. докл. III Конгресса нефтепромышленников России. - Уфа: Реактив, 2001. – С. 321.

8. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф., Хайруллин А.Р. Ремонт нефтегазохимического оборудования из стали 15Х5М // Тез. докл. 53-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002.

9. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф. Ремонтная полуавтоматическая сварка змеевиков трубчатых печей // Проблемы строительного комплекса: Тез. докл. 6-й Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002.

10. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф. Ресурсосберегающая технология сварки технологических трубопроводов из стали 15Х5М // Промышленная и технологическая безопасность: проблемы и перспективы: Сб. науч. тр. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – С.177-180.

11. Халимов А.Г., Габбасов Д.Ф., Хисматуллин А.Р., Фаизов И.Ф. Внедрение в учебный процесс современных методов технического диагностирования потенциально опасных объектов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002.

12. Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.А., Ибрагимов И.Г., Габбасов Д.Ф., Вахитов А.Г. Ресурсосберегающая технология изготовления и ремонта нефтегазохимического оборудования из жаропрочных хромистых сталей // Нефтегазовое дело. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. - Т.1 – С. 279 – 289.