

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК. 621.052.08

К.А. Лисицын, А.Н. Смирнов

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОПРОВОДОВ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ, ОТРАБОТАВШИХ РАСЧЕТНЫЙ СРОК В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Тепловые электрические станции (ТЭС) оснащены мощными энергетическими установками, производящими тепловую и электрическую энергию. Обеспечение высокой работоспособности и надежной эксплуатации оборудования ТЭС в значительной степени зависит от правильного выбора материала для его изготовления и качественного проведения сварочных работ.

Металл элементов паровых котлов и трубопроводов работает в критических условиях, при высоких температурах и под постоянным или изменяющимся внутренним давлением, при воздействии высоких напряжений, вызванных усилиями самокомпенсации и массовыми нагрузками.

В зависимости от условий эксплуатаций для изготовления паропроводов применяют углеродистые и легированные стали. При длительной эксплуатации в металле энергооборудования происходят сложные физико-химические явления, связанные с изменением структурно-фазового состава и физико-механических характеристик. Протекают процессы сфероидизации перлита и коалесценции карбидных частиц. Сфероидизация перлита это процесс перехода карбидных пластин в термодинамически более устойчивую сферическую форму с повышением температуры. Сфероидизация перлита может привести к снижению прочностных свойств металла – при развитой сфероидизации, соответствую-

щей баллу 5 – 6 шкалы ОСТ 34-70-960-96 снижение прочностных свойств может достичь 20% от исходного. Сфероидизация вызывает также увеличение скорости ползучести. Все эти явления приводят к образованию и накоплению микроповрежденности (микротрецин), к появлению макротрецин и разрушению оборудования [1].

Сварные соединения являются наиболее повреждаемыми узлами элементов энергооборудования [2]. Наиболее слабым звеном в сварном соединении является зона термического влияния. Вероятность разрушения сварного соединения по шву резко возрастает при наличии в шве геометрической неоднородности и низких пластических свойств наплавленного металла.

Эксплуатационные повреждения сварных соединений обычно связаны с одновременным действием ряда факторов, которые в первом приближении могут быть выделены в три основные группы [2]:

- наличие в изделии концентраторов напряжений, вызванных дефектами формы стыка (неснятное усиление шва, применение подкладных колец или замка в корне шва, резкий переход сечения свариваемых элементов в районе стыка), технологическими дефектами (трещины, поры и шлаковые включения), возникшими при изготовлении изделия, и образованием начальных, стабильно растущих, трещин из-за усталости, ползучести или коррозии;

- высокая степень напряженности стыка от действия рабочих, термических и остаточных напряжений;

- несоответствие свойств материала конструкции или металла отдельных зон сварного соединения требуемому уровню в результате использования некачественных или несоответствующих техническим условиям сварочных материалов, отклонений от оптимальных режимов сварки и термической обработки.

Большой научный и практический интерес представляет исследование сварных соединений после длительных, сверхрасчетных сроков эксплуатации с целью определения возможности их дальнейшей работы. В настоящей публикации проведены результаты исследований уникальных сварных соединений паропроводов, изготовленных из углеродистых сталей, выплавленных в Германии в 1929 – 1933 годах, и из стали 20 (ГОСТ 1050), выплавленной в СССР в пятидесятые годы. Срок эксплуатации исследованных сварных соединений и паропроводов составляет – 177408 – 580608 час. Паропроводы эксплуатировались на Тепловой электростанции Кузнецкого металлургического комбината (ТЭЦ КМК) г. Новокузнецка с 1943 г. Рабочие параметры среды: давление – 2,7 МПа, температура – 400 °С. К сожалению, на ТЭЦ КМК не сохранилась сварочная документация, отсутствует информация о примененных сварочных материалах,

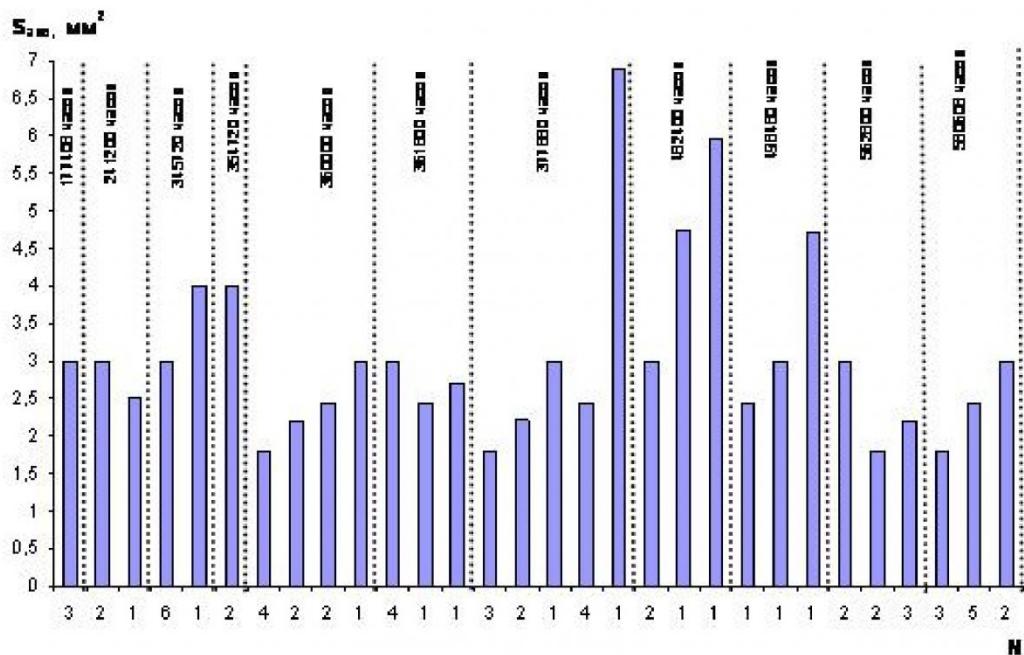


Рис. 1. Характер распределения дефектов ( $S$  - эквивалентная площадь дефектов, выявленных УЗК) в сварных соединениях паропроводов;  $N$  – число сварных соединений с дефектами после различных сроков эксплуатации

режимах и способах сварки и т.д.

Согласно требованиям нормативно-технической документации (НТД) Госгортехнадзора России (в настоящее время Ростехнадзора), все сварные соединения подвергались неразрушающему контролю (НК) в определенные сроки, часто совпадающие со сроками проведения

капитальных ремонтов.

Методами ультразвуковой дефектоскопии (УЗК) проконтролировано более 200 сварных соединений паропроводов с различными сроками эксплуатации. На рис.1 приведены результаты УЗК только тех сварных соединений, в которых обнаружены дефекты. Анализ результатов НК показал, что не

существует зависимости между сроком эксплуатации сварных соединений и эквивалентной площадью дефектов, выявленных УЗК. Распределение дефектов носит стохастический характер, которое связано, в первую очередь, с условиями выполнения сварочных работ.

С целью определения опасности выявленных дефектов

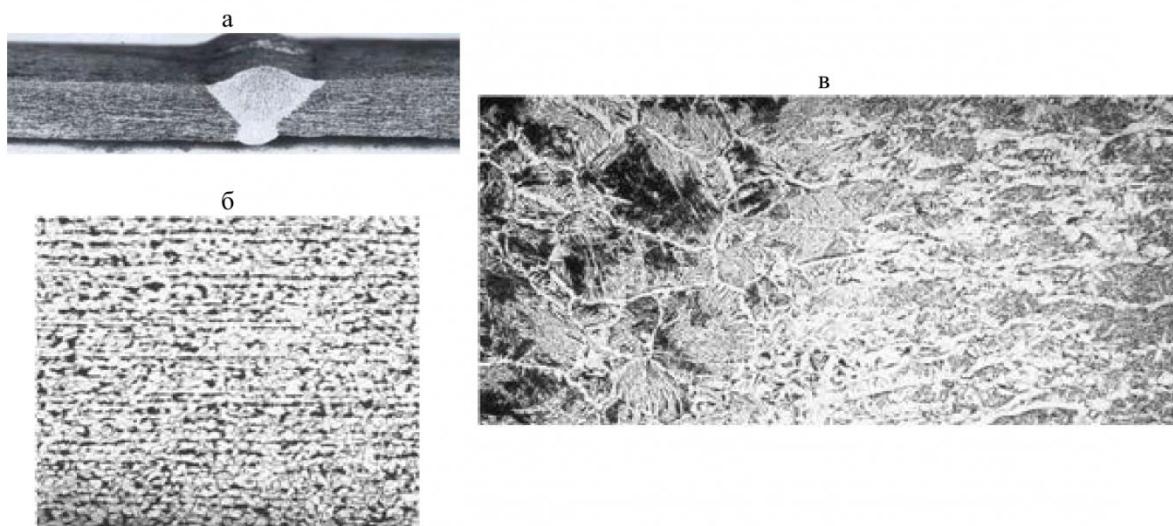


Рис.2. Внешний вид и структура сварного соединения паропровода, изготовленного из стали 20 после 329640 часов эксплуатации: а – вид сварного соединения; б – микроструктура основного металла,  $\times 100$ ; в – микроструктура зоны термического влияния  $\times 200$

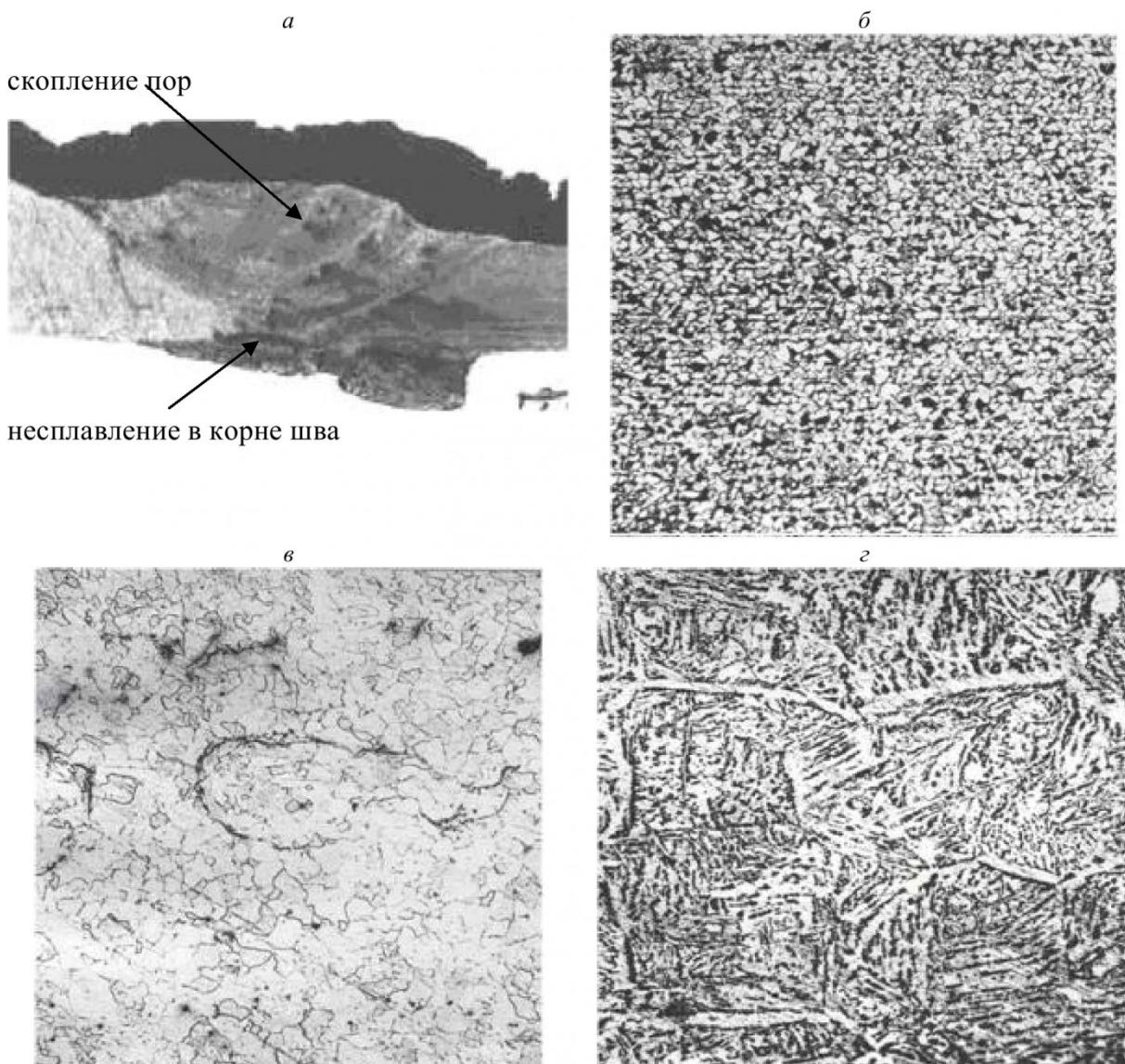


Рис.3. Дефекты и характер микроструктуры в сварном соединении после 361800 часов эксплуатации (сталь 20): а – макроструктура сварного соединения; б – микроструктура основного металла, х100; в – микроструктура металла шва с неметаллическими включениями, х150; г – микроструктура зоны перегрева, х200

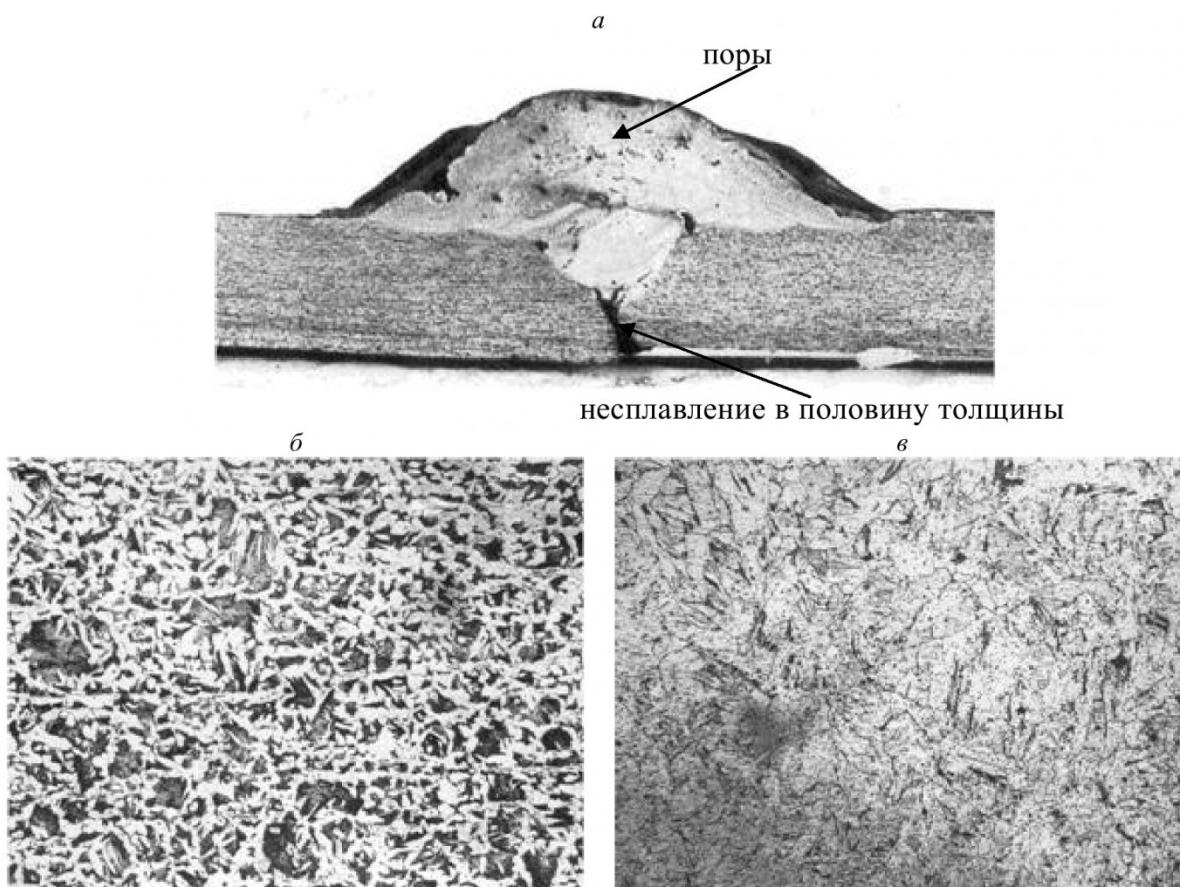
сварки для дальнейшей эксплуатации оборудования из паропроводов была проведена вырезка двух дефектных сварных соединений и одно – бездефектное, которые подвергались металлографическому исследованию. Из этих же сварных соединений были изготовлены образцы для определения механических характеристик.

Металлографический анализ проводили на микроскопе МИМ – 8М при увеличениях х100, х150, х200, х500, х1000, механические испытания – на разрывной машине ЦДМУ – 30.

Из паропровода к турбогенератору №1 (рег.№ 1260, дата пуска – сентябрь 1958г.) исследовали сварные соединения после **329640** и **361800** часов эксплуатации (материал – сталь 20). В сварном соединении паропровода после **329640** часов эксплуатации дефектов не выявлено (рис. 2а). Структура основного металла феррито-перлитная, величина зерна соответствует баллу 9 – 10 шкалы ГОСТ 5639-82, сфероидизация перлита соответствует баллу 3 шкалы ОСТ 34-70-960-96, полосчатость феррито-перлитной

структуре – 4 баллу по шкале 3 ГОСТ 5640-68 (рис. 2б). Микроструктура сварного шва состоит из зерен феррита с величиной зерна до 2 балла шкалы ГОСТ 5639-82. и видманштейновой структурой до 3 балла по шкале 4 ГОСТ 5640-68 (рис. 2в).

В соединении (труба и фланец) после **361800** часов эксплуатации в металле шва выявлены поры размером 0,2x0,05 мм, а также несплавления, длиной от 1,3мм и до 5мм в корне шва (недопустимый дефект сварки согласно РТМ 1С - 2001). В макроструктуре шва по



*Рис.4. Дефекты сварки и микроструктура сварного соединения паропровода после 482400 часов эксплуатации, изготовленного из стали St 42.11: а – макрорефекты в сварном шве; б – микроструктура в зоне термического влияния; х150, в – микроструктура металла шва, ; х150*

линии сплавления шва наблюдаются непрерывные цепочки шлаковых включений, протяженностью до 7 мм (рис. 3а). Микроструктура основного металла состоит из зерен феррита и перлита, величина которых оценивается 7 - 8 баллом ГОСТ 5639-82 (сфероидизация перлита соответствует 4 баллу шкалы ОСТ 34-70-960-96). В микроструктуре металла трубы выявлена структурная полосчатость 2 балла шкалы 4А ГОСТ 5639-82(рис.3б). В микроструктуре наплавленного металла наблюдаются неметаллические включения (рис. 3в). В зоне термического влияния обнаружены участки перегрева с величиной зерна крупнее 1 балла и видманштеттовой структурой, оцениваемой 4-5 баллами шкалы 4А ГОСТ 5640-68 (рис. 3г). Микроструктура фланца представляет собой зерна феррита и перлита,

величина которых оценивается 7 баллом шкалы ГОСТ 5639-82.

Как в первом, так и втором случае структурно свободного графита в микроструктуре сварного соединения не выявлено.

Также было исследовано сварное соединение паропровод к турбогенератору №7 (рег.№2662, дата пуска - 1943г.). с наработкой 482400 часов (материал – сталь St 42.11). В результате исследования в макроструктуре сварного соединения обнаружено большое скопление пор размером до 0,5мм и непропар в половину толщины стенки, который является недопустимым дефектом согласно требованиям РТМ-1С-2001 (рис. 4а). Микроструктура основного металла представляет собой перлит и феррит с величиной действительного зерна, соответствующему баллу 8 шкалы ГОСТ 5639-82 (сфероидизация

перлита соответствует баллу 2 шкалы ОСТ 34-70-960-96). В микроструктуре трубы выявлена структурная полосчатость первого балла шкалы 3 ГОСТ 5640-68. В зоне термического влияния наблюдается участки перегрева с величиной зерна 5-6 балла шкалы ГОСТ 5639-82 и видманштеттевой структурой 3 балла шкалы ГОСТ 5640-68 (рис 4б). В микроструктуре наплавленного металла наблюдается игольчатое строение (рис. 4в), а в нижних слоях шва нормализованная мелкозернистая структура с величиной зерна 6 балла шкалы ГОСТ 5639-82 (сфероидизация перлита соответствует второму баллу шкалы ОСТ 34-70-960-96). Структурно-свободного графита в микроструктуре шва и околосшовной зоне не выявлено.

Как видно из рис. 3а, в сварном соединении после

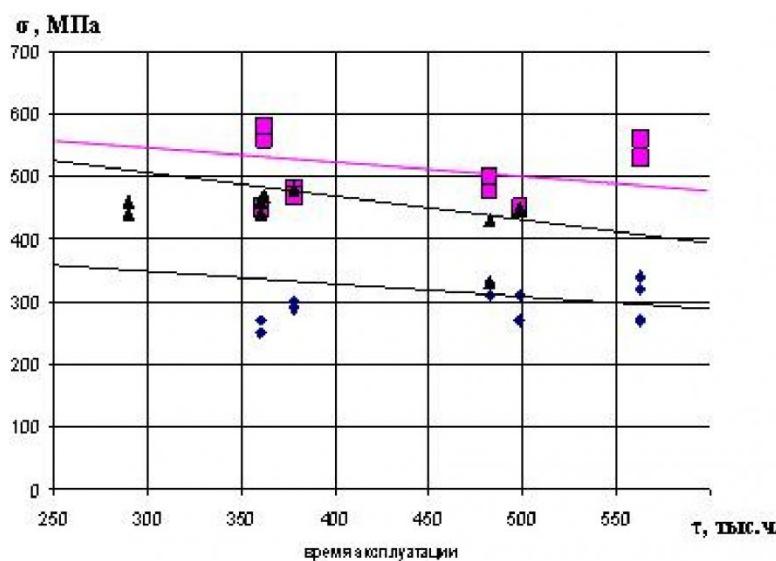


Рис.5. Механических характеристик сварных соединений паропроводов после различных сроков эксплуатации: ■ — временное сопротивление разрыву основного металла, МПа; ▲ — временное сопротивление разрыву сварного соединения, МПа; ♦ - предел текучести основного металла. МПа

361800 часов эксплуатации дефекты обнаружены как в наплавленном металле, так и в корне шва. «Несплавление» расположено практически параллельно образующей трубы и имеет затупленное окончание. Такой характер, месторасположение и форма дефекта не может привести к образованию трещины в металле шва из-за направленности «несплавления» и низкой концентрации напряжений в его окончании. Поры также не создали в наплавленном металле значительной концентрации напряжений при длительной эксплуатации, так как имеют округлую форму. В сварном соединении после 482400 часов эксплуатации поры выявлены преимущественно в усилении шва. В этом соединении из-за некачественной подготовки стыкуемых кромок труб под сварку и нарушения технологии сварки произошло образование «непровара» в половину толщины стенки (рис.4а). «Непровар» имеет затупленное раздваивающееся окончание. Образованию трещин препятствовала стабильная микроструктура металла и, по-видимому, «мягкие» режимы

эксплуатации (отсутствие резких перепадов температур и давлений пара). Отсутствие трещин в металле шва после длительной эксплуатации свидетельствует о низкой концентрации напряжений в зоне дефектов.

Механические характеристики основного металла и сварных соединений в процессе длительной эксплуатации изменились незначительно (рис.5). Временное сопротивление разрыву соединения после 482400 часов работы относительно высоко и составляет 425 МПа в бездефектной зоне, а на участке «непровара» достигает 330 МПа. Стабильность механических характеристик металла паропроводов в процессе длительной эксплуатации сверхрасчетные сроки, а также анализ микроструктуры подтверждает высокое качество углеродистых сталей, поставляемых в прошлом веке для изготовления энергооборудования.

#### Выводы

1. При длительной эксплуатации в исследованном металле паропроводов произошли процессы сфероидизации перлита, причем в немецкой стали St 42.

11 сфероидизация перлита соответствует лишь второму баллу шкалы ОСТ 34-70-960-96 при работе более 400 тыс. час., а в стали 20 после 300 тыс. и более часов эксплуатации сфероидизация достигает третьего, четвертого баллов, что свидетельствует о высокой стабильности структуры немецкой стали - St 42.11.

2. Металлографические исследования показали, что наличие недопустимых дефектов (согласно требованиям нормативно-технической документации) не привело к образованию трещин в исследованном металле при длительной эксплуатации, а анализ размеров, формы и месторасположения дефектов в сварных соединениях показал отсутствие зон с высокой концентрацией напряжений.

3. Результаты настоящего исследования, а также большой опыт эксплуатации дефектных сварных соединений - сроки, значительно превышающие расчетные, позволяют сделать вывод о возможности работы паропроводов с дефектами сварки при условиях: детальной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) в металле шва; четкого представления о размерах, форме, характере и причинах образования дефектов.

4. Механические свойства основного металла и исследованных сварных соединений при длительной эксплуатации изменились незначительно, (за исключением сварного соединения с «непроваром» после 482400 часов) удовлетворяют требованиям нормативно-технической документации и находятся на нижнем пределе допустимых величин.

Для решения вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации паропроводов с дефектными сварными соединениями сверхрасчетные сроки и уточнения норм разбраковки сварных соединений необходимо решить следующие задачи.

1. Оценить влияние различных типов дефектов сварки (их размеров, формы и расположения) на напряженно-деформированное состояние в металле шва.

2. Определить допустимый уровень напряжений для оценки возможности дальнейшей экс-

плуатации дефектных сварных соединений в зависимости от структурно-фазового состояния, внутренних дальнодействующих полей напряжений, физико-механических характеристик, параметров среды, марки стали и сроков наработки.

3. Разработать методику

оценки напряженно-деформированного состояния сварных соединений с привлечением методов неразрушающего контроля.

Результаты исследований по решению вышеуказанных задач будут приведены в следующих публикациях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Смирнов А.Н., Герике Б.Л., Муравьев В.В. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.
- Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов - М.: Машиностроение, 2002. -352с.

Авторы статьи:

Лисицын

Константин Александрович  
- ведущий специалист ООО ПКП  
«Энергопром – М» (г. Новокузнецк)

Смирнов

Александр Николаевич  
- докт. техн. наук, доц. каф.  
«Технология машиностроения»

УДК.621:797:629:114:41

Б. И. Коган

## О СОЗДАНИИ НАУЧНЫХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕМОНТА МАШИН

Условия эксплуатации объективно определяют виды взаимодействия поверхностей трибосопряжений, (в т. ч. рабочих) и неподвижных, а каждому виду взаимодействия поверхностей соответствуют наиболее характерные виды их разрушения, приводящие к отказу конкретного элемента или узла машины.

Характер контакта и нагрузки в сопряжениях опреде-

ляет вид и скорость отказов, предопределяет необходимые конструктивные и технологические мероприятия по обеспечению надёжности сопряжений. В табл. 1 приведены типичные виды контактов и предпосылки отказов:

В табл. 2 приведены сопутствующие свойства сопрягаемых поверхностей (подвижных и неподвижных) и особенности рабочей среды, определяющей

надёжность сопряжений.

Надёжность машины можно выразить через ресурс  $T_p$  лимитирующего сопряжения:

$$T_p = (S_\phi - S_k)/Y, \quad (1)$$

где  $S_\phi$  – функциональный зазор, мкм;  $S_k$  – конструкционный зазор при сборке, мкм;  $Y$  – скорость изнашивания, мкм/ч.

В работах проф. А.Г. Суслова показано определяющее влияние на показатели на-

Виды контактов и предпосылки отказов

Вид контакта	Вид перемещения или его отсутствие	Типовые примеры	Предпосылки отказов
По поверхности (плоской или кривой)	Без перемещения (неподвижное сопряжение)	Шлицевые, шпоночные сопряжения	Смятие, фреттинг-процесс
	Скольжение	Цилиндрические, геликоидные, резьбовые, плоские, колодочные тормоза	Износ (истирание)
По линии	Без перемещения	Контактные	Смятие, фреттинг-процесс
	Скольжение	Выглаживание	Износ (истирание)
	Обкатка, качение без скольжения	Подшипники качения	Поломка
	Качение со скольжением	Зубчатые зацепления, кулачковые пары, подшипники качения	Износ, усталость, отслаивание, поломка

Таблица 1