

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПАРОПРОВОДОВ ОСТРОГО ПАРА, ОТРАБОТАВШИХ РЕСУРС

Оценка состояния и контроль металла паропроводов проводится после выработки ресурса согласно РД 10-577-03 и СО 153-34.17.470-2003. Состояние паропроводов, работающих в условиях ползучести, характеризуется совокупностью ряда параметров: остаточная деформация, механические свойства, предел текучести при рабочей температуре, длительная прочность, величина овальности гибов, сплошность по результатам неразрушающего контроля, уровень микроповрежденности. При анализе состояния необходимо учитывать совокупность перечисленных факторов, что на практике не всегда возможно.

В основном при продлении ресурса паропроводов, эксплуатирующихся при температуре 545 и 560 °С, ограничения срока эксплуатации связаны с состоянием гибов из-за оценки их микроповрежденности. Практика контроля за микроповрежденностью показала, что из-за отсутствия четкой методики способы проведения контроля трактуются в ряде случаев неоднозначно, а результаты контроля не показывают фактической картины состояния гибов.

Исследование на микроповрежденность складывается из:

- выбора гибов для проведения анализа;
- выбора места на гيبة, чтобы сделать шлиф;
- непосредственно подготовки шлифа;
- оценки результатов контроля.

По действующей НТД анализ микроповрежденности следует проводить на 3-х гибох, выбранных по результатам замеров остаточной деформации и расчета напряженного состояния трассы паропровода. Такой выбор имеет ряд существенных недостатков. К ним относится неточность замеров ОД, отсутствие автоматизации и «человеческий» фактор. Место проведения анализа на гибох выбирается, как правило, на «горбушке» растянутой зоны, а также по результатам замеров толщины стенки в растянутой зоне и овальности. Первый вариант выбора места для проведения анализа – измерение толщины стенки, овальности, определение сечений на гيبة с минимальной овальностью и толщиной стенки. Есть также предложение проводить выбор места анализа по результатам УЗК растянутой зоны по специальной методике ультразвукового контроля «на порь». Второй вариант – учет всех факторов: толщина стенки, овальность, рез-ты УЗК.

Способы приготовления шлифов у разных специалистов сильно различаются. Обычно приготовление шлифа «на микропоры ползучести» - это достаточно трудоемкий процесс. Для теплостойких сталей типа 12X1MФ или 15X1MФ он может занимать много времени и состоит из стадии первоначальной подготовки шлифа - шлифовки и полировки, стадии травления шлифа, обычно раствором азотной кислоты в спирте с концентрацией 4-6 % с последующей переполировкой и третьей стадии - травление шлифа для выявления микроструктуры металла.

Просмотр шлифа и оценка степени микроповрежденности проводится или после второй стадии, когда просматривается полированный шлиф или (и) после последней третьей стадии подготовки, когда просматривается шлиф с выявленной микроструктурой. Длительность операции травления составляет от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. После каждой операции травления или полировки шлиф промывается спиртом и сушится.

Используются также методики, отличающиеся от стандартной процедуры. Травление проводят реактивом с повышенной концентрацией азотной кислоты с 4-6 до 9-12 %, выдержка при травлении не проводится, а сразу промывка и сушка шлифа сразу после смачивания кислотой, а полировку прекращается сразу после удаления следов травления. При таком травлении реактив полностью не удаляется из микропор после промывки шлифа, их травление продолжается в течении всего времени подготовки шлифа. Окончательное травление проводится реактивом с пониженной концентрации

кислоты (2-4 %) для выявления микроструктуры.

Существуют различные мнения по поводу оценки степени микроповрежденности. Один вариант – проводить оценку на подготовленном но нетравленном шлифе. Второй вариант – оценивать только травленный шлиф. Третий вариант – проводить анализ сначала на нетравленном шлифе, затем – на том же участке после травления. Результат оценки микроповрежденности каждый раз будет различным.

Для оценки объективности анализа проводился эксперимент по статистической обработке результатов оценки микроповрежденности, выполненной разными специалистами. Т.е. подсчет количества микропор проводился разными специалистами по одной микрофотографии.

Для проведения подсчета были отобраны 3 образца. С помощью микроскопа при увеличении 500 крат были получены снимки шлифов (по несколько изображений травленной и нетравленной части каждого образца). Определено количество микропор на каждом из снимков. Измерения проводились пятью операторами в условиях повторяемости. Проведена статистическая обработка результатов по определению плотности микропор (пор/мм<sup>2</sup>) следующими способами:

1. графический анализ по h-характеристике Манделя – не показал выбросов.
2. статистический тест по критерию Граббса выбросов не выявил.

Статистических «выбросов» не обнаружено.

По таким данным можно оценить, насколько количество пор, определённых первым методом (по нетравленным шлифам), превышает количество пор, определённых вторым методом (по травленным шлифам), а так же насколько погрешность метода «по травленным образцам» больше метода «по нетравленным образцам». Был сделан вывод, что выявляемость пор на травленных образцах хуже, чем на нетравленных в среднем на 40 %, а погрешность измерения больше на 10 %.

Исследование поврежденных гибов показали, что повреждения имеют вид прерывистых продольных трещин в центральной области растянутой зоны гибов. Параллельно основной трещине имеются, как правило, мелкие трещинки. Механические свойства: прочностные и пластические и ударная вязкость не снижаются по сравнению с состоянием поставки, химанализ гибов соответствует марочному.

Микроповрежденность локализуется в узкой области трещин в месте повреждения. В некоторых случаях наблюдается высокая степень локализации накопления остаточной деформации в зоне разрушения. В результате данные, полученные при металлографических анализах методом реплик и результаты анализа микроповрежденности по сечению гива могут сильно расходиться.

Примером может служить сравнение результатов металлографического анализа, выполненного методом реплик (рис. 1.) и на поперечном шлифе на у наружной поверхности уже демонтированного гива (рис. 2.). Металлографический анализ проводился специалистами производственной лаборатории, шлифы приготовлены специализированной организацией. По реплике микроповрежденность соответствует баллу 5, фактическая степень микроповрежденности – балл 3.

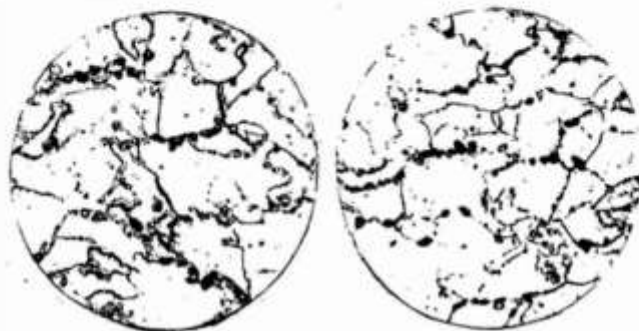


Рис.1. Микроструктура гива по репликам лаборатории НК (x500) сделана у

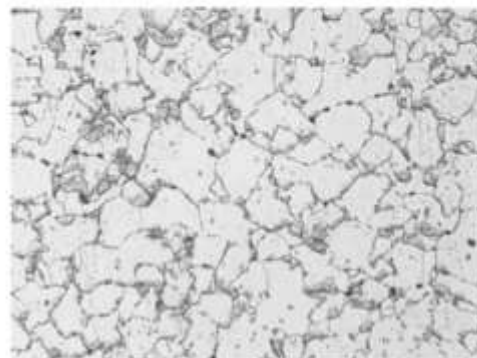
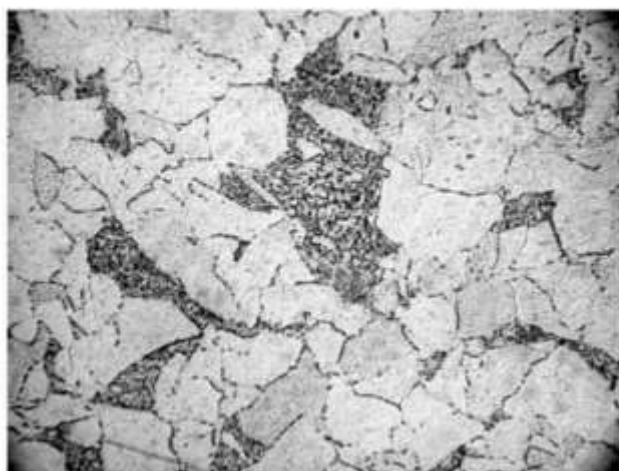


Рис.2. Микроструктура гива после демонтажа с паропровода. Поперечный шлиф, фотография наружной поверхности

Для определения состояния микроструктуры визуальным способом разработана специальная шкала микроповрежденности, позволяющая проводить приблизительную оценку методом сравнения по фотографии (рис.3.). На шкале указана плотность пор в цифрах.

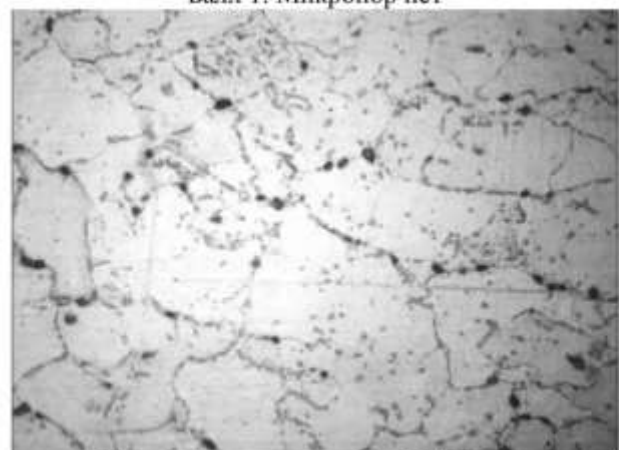
Все перечисленное, а именно: разный подход к выбору гибов для анализа, к выбору места проведения анализа на каждом гиве, к подсчету кол-ва микропор и к анализу результатов требует унификации методик проведения металлографических анализов и закрепления их в форме инструкций или руководящих документов, обязательных к исполнению всеми специалистами, а в шкале микроповрежденности следует указать плотность пор в цифрах.



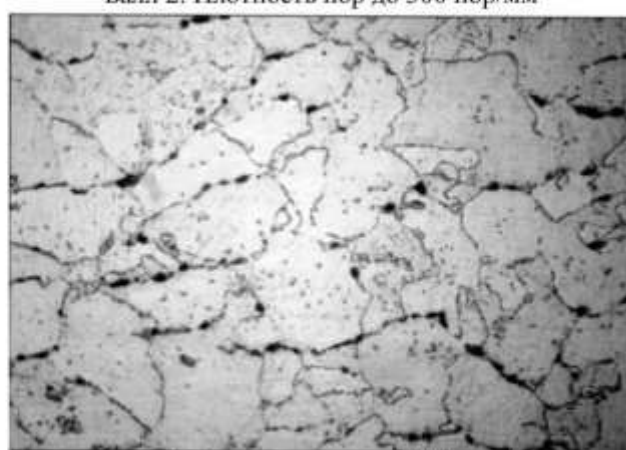
Балл 1. Микропор нет



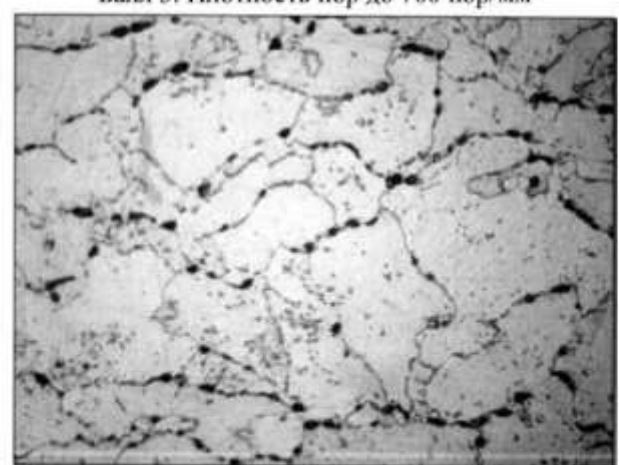
Балл 2. Плотность пор до 300 пор/мм



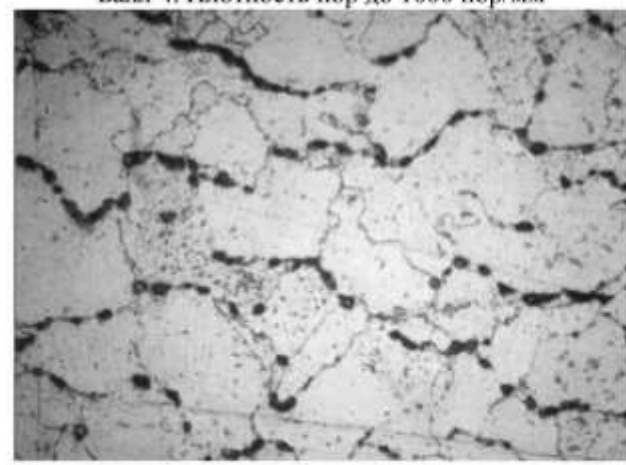
Балл 3. Плотность пор до 700 пор/мм



Балл 4. Плотность пор до 1000 пор/мм



Балл 5. Плотность пор до 2000 пор/мм



Балл 6. Плотность пор до 3000 пор/мм

Рис. 3. Предлагаемая шкала для оценки микроповрежденности визуальным методом по фотографии

Проводилось изучение распределения микроповрежденности в гibaх высокотемпературных паропроводов из стали 12Х1МФ по наружной поверхности и по сечению от наружной поверхности к внутренней. На наружной поверхности разрушенных гибов максимальная микроповрежденность была равна 6000 – 7000 шт/мм<sup>2</sup>.

Исследовалось также зависимость микроповрежденности на наружной поверхности растянутой зоны от толщины стенки трубы и овальности сечения. Микроповрежденность на растянутой зоне гибов определялась ультразвуковым методом с использованием зависимости между удельным количеством микропор и скоростью поверхностных волн. На участках с экстремальными значениями микроповрежденности (по результатам ультразвуковых измерений) проводились металлографические исследования.

Результаты исследования показывают, что во всех исследованных зонах поперечного сечения трубы микроповрежденность микропорами ползучести наблюдается по всей толщине трубы. В растянутой зоне гiba удельная микроповрежденность плавно уменьшается в направлении от наружной поверхности к внутренней (примерно в два - три раза).

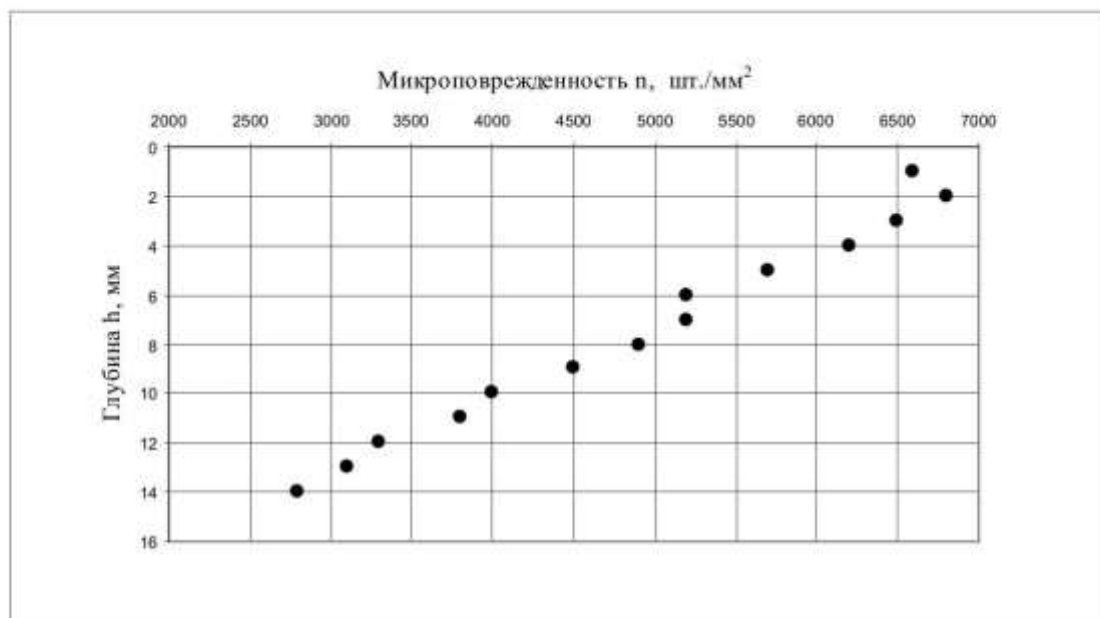


Рис.4. Распределение микроповрежденности по толщине трубы от наружной поверхности к внутренней в растянутой зоне одного из гибов

В нейтральной зоне исследованных гибов наблюдается обратная закономерность: максимальная микроповрежденность наблюдается у внутренней поверхности гiba, и микроповрежденность достаточно быстро уменьшается по направлению к наружной поверхности.

Эти результаты не содержат ничего неожиданного и полностью коррелируют с распределением приведенных (окружных растягивающих) напряжений в гibe толстостенной трубы.

Результаты исследования распределения микроповрежденности по наружной поверхности гiba показывают, что если рассматривать поперечное сечение гiba, то ширина зоны с максимальной микроповрежденностью, расположенная на наружной поверхности гiba, составляет  $(0,1-0,15)D_{\text{трубы}}$ . Исследование разрушенных гибов подтверждает этот результат: на расстоянии 20 мм от места повреждения микропоры ползучести практически отсутствуют.

Подтверждено также ожидаемое совпадение пропорциональности максимального значения удельного количества микропор в растянутой зоне с минимальным значением овальности. Такое совпадение наблюдалось в 60-80% исследуемых гибов. Разделить зависимости максимального удельного количества микропор от минимальной толщины стенки и овальности не удалось. Отчасти это может быть объяснено тем, что зависимость минимальной толщины стенки от максимальной овальности достаточно уверенно наблюдается в гibaх в состоянии поставки. Если рассматривать в растянутой зоне гiba три участка: участок с минимальной толщиной стенки, и два участка с экстремальными значениями овальности (максимальным и минимальным) то на одном из этих участков будет максимальная микроповрежденность. Это обстоятельство вполне объяснимо следующими причинами: уменьшение толщины стенки и увеличение овальности дают прибавку к окружным растягивающим напряжениям. Но овальность со временем уменьшается и к моменту обследования участок, где она была максимальной в состоянии поставки не обязательно будет иметь максимальную овальность.

Важно исследование микроповрежденности по сечению гибов: максимальный уровень микроповрежденности в поверхностных и подповерхностных «слоях» металла. Такое исследование позволяет оценить «глубину» развития ползучести по сечению металла.

Второй вопрос, на котором нужно остановиться – контроль остаточной деформации (ОД) труб.

После наработки 280-300 тысяч часов при рабочей температуре 545 и 560 °С гiby ряда паропроводов имеют остаточную деформацию, приближающуюся к 1 %.

Согласно перечисленным в начале статьи НТД, остаточная деформация анализируется по результатам замеров бобышек (реперов). Результат зависит в первую очередь от точности проведения измерений, в том числе от точности первоначальных замеров, от температуры, при которой производится замер, от измерительного инструмента и от квалификации специалистов, проводивших замер. Согласно РД 10-577-03 остаточная деформация не должна превышать для прямых участков гнутых труб независимо от марки стали - 0,8 % диаметра, для прямых труб из стали 12X1МФ 1,5 % диаметра, для прямых труб из сталей других марок – 1,0 % диаметра. Согласно СО 153-34.17.470-2003 остаточная деформация сталей 12X1МФ и 15X1М1Ф для блоков СКД не должна превышать для пря-

мых труб и прямых участков гибов - 0,6 %, в разных инструкциях - разные критерии. Т.е. по нормам контроля для оборудования, работающего по трансферной и блочной схемам при одинаковых рабочих параметрах применяются разные критерии оценки.

Исследование гибов с остаточной деформацией 0,8% и более из сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф показало, что их свойства соответствуют состоянию поставки, а уровень микроповрежденности не превышает 2-го балла.

Вероятно следует вернуться к первым инструкциям по контролю за металлом, где предполагалось оценивать скорость ползучести.

Следует отметить, что на трубах с деформацией 0,8-1 % обнаруживается трещинообразование в местах приварки врезок и штуцеров. Так, на одном из блоков 300 МВт после 290 тысяч часов эксплуатации были обнаружены трещины в местах приварки штуцеров (рис. 5), объем контроля был увеличен и на паропроводе острого пара на 15 участках были обнаружены трещины. Трещины проходили по линии сплавления углового шва приварки штуцера и шли под углом 45° к отверстию трубы.



Рис. 5. Место образования трещины на сварном стыке приварки штуцера

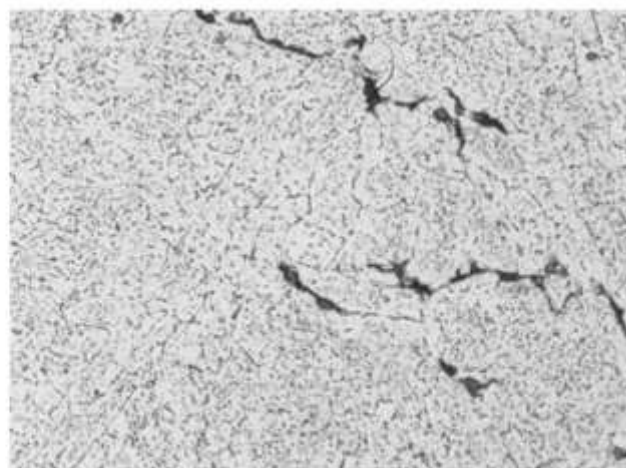


Рис. 6. (×500)  
Микротрещины в основном металле трубы

Металлографический анализ показал, что трещины идут по границам зерен и имеет место порообразование, т.е. разрушение идет по механизму ползучести. Причину трещинообразования следует связать с ползучестью труб и жесткостью конструкции узла приварки штуцеров к трубам.

### Выводы

1. Необходима унификация методик проведения металлографических анализов и закрепления их в форме инструкций или руководящих документов, обязательных к исполнению всеми специалистами,
2. При оценке микроповрежденности следует рассчитывать плотность пор.
3. Отбраковку труб при ползучести следует проводить по скорости ползучести, а не по величине остаточной деформации.
4. На паропроводах с остаточной деформацией более 0,8 % проводить 100 % контроль мест приварки штуцеров и бобышек.