

– магнитный (коэрцитиметрический) метод контроля (контроль по уровню значений коэрцитивной силы при выборе материала покрытия под конкретную марку подложки);

– контроль по твердости (контроль на соответствие требуемого диапазона значений по твердости);

– контроль по трещиностойкости (для выбора по максимальному уровню трещиностойкости материала для нанесения покрытий).

Таким образом, используя указанные выше рекомендации, возможно максимально эффективно подобрать вид и марку материала для восстановления конкретного изделия, а также скорректировать технологические режимы и приемы нанесения покрытия на изделие с позиции оценки качества системы «покрытие–подложка» и потенциальной ее работоспособности и надежности.

УДК 621.052.08

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО–ФАЗОВОГО СОСТАВА И ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПАРОПРОВОДОВ ТЭС**

А.Н. Смирнов<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., А.В. Бенедиктов<sup>2</sup>, инж.,

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет,

<sup>2</sup>Кемеровская ГРЭС

(г. Кемерово, Российская Федерация)

Надежное прогнозирование работоспособности технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО), является одной из основных проблем в промышленности. В России более 70 % потенциально опасного оборудования отработало расчетный срок службы, и старение значительно опережает темпы технического перевооружения. Только в энергетике по состоянию на август 2009 года около 90 % технических устройств тепловых электростанций исчерпало ресурс, большая его часть достигла физического износа.

Существующий в настоящее время подход к прогнозированию работоспособности и увеличению эксплуатационного ресурса металла ТУОПО отличается большим многообразием руководящих документов, методов, методик и средств исследований и испытаний. Поэтому очевидна необходимость разработки нового методологического подхода к оценке работоспособности металла ТУОПО, основанного на выявлении закономерностей эволюции микроструктуры и изменения физико–механических характеристик неразрушающими физическими методами исследования.

Акустические методы испытаний имеют ряд преимуществ, заключающихся в уникальных свойствах ультразвуковых волн выявлять множество рассеян-

ных микроповреждений, размеры каждого из которых меньше порога чувствительности многих других методов испытаний.

В металле ТУОПО накопление микроповрежденности, образование микро- и макротрещин происходит, преимущественно, в поверхностных слоях изделий и применение акустических методов может привести к выявлению таких зон. Одним из важнейших достоинств акустических методов является возможность исследовать поверхностные микроструктурные несовершенства в материалах с применением поверхностных акустических волн Рэлея (ПАВ).

Цель настоящей работы заключается в установлении закономерностей изменения акустических характеристик в зависимости от структурно-фазового состояния теплоустойчивых сталей и разработка критерия предельного состояния металла ТУОПО ТЭС.

В работе исследовано более пятисот паропроводных и пароперегревательных труб и сварных соединений после различных сроков эксплуатации (от 15 до 450 тыс. час.), разрушенных труб и их гибов, а также контрольных участков паропроводов Томь–Усинской, Беловской и Кемеровской ГРЭС, Западно-Сибирской и Ново-Кемеровской ТЭЦ, изготовленных из сталей 20, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР.

Определены механические свойства, исследована микроструктура с применением оптической, электронной дифракционной, растровой микроскопии, спектрально-акустического и акустико-эмиссионного методов. Проведены испытания на длительную прочность при температуре 600°C. Измерена плотность сталей, выполнен фазовый анализ и высокотемпературные испытания на ползучесть.

При увеличении срока наработки металла от исходного состояния до 287 тыс. час. длительная прочность, экстраполированная на  $10^4$  час., снизилась от 149 до 28 МПа (сталь 12Х1МФ). Со снижением уровня длительной прочности стали 12Х1МФ после большого срока наработки при рабочих параметрах произошло повышение содержания легирующих элементов в карбидном осадке, а именно, *Cr* от 17,8 до 37,0%, *Mo* от 28,2 до 55,3% и *V* от 60,8 до 79,3%. При длительной эксплуатации в сталях происходит дифференциация бейнитной и перлитной составляющих, сфероидизация и коагуляция карбидов с преимущественным их выделением по границам зерен. Бейнитные зёрна неоднородны по своему строению, ферритная матрица бейнитных зёрен характеризуется неоднородной плотностью дислокаций. Микроструктура металла трубы с минимальной длительной прочностью (28 МПа) состоит из феррита и крупных коагулированных карбидов, расположенных по границам зёрен, мелкие карбиды распределены в ферритных зёрнах, на границах зёрен обнаружены микропоры.

В сталях с длительной прочностью свыше 100 МПа обнаружено три типа дислокационных субструктур (ДСС): сетчатая, клубково-ячеистая и фрагментированная. Основным типом субструктуры является сетчатая. Клубково-ячеистая и фрагментированная ДСС встречаются значительно реже. В сталях с длительной прочностью ниже 90 МПа клубково-ячеистая субструктура отсутствует. Основным типом субструктуры здесь является *фрагментированная*.

На поверхности паропроводов и в зонах разрушений в отдельных участках присутствует еще один (четвертый) тип субструктуры – субструктура с *высокой плотностью окисления*. Пятым типом субструктуры, присутствующим в исследуемых сталях, является *субструктура предразрушения* (микротрещины). Трещины наблюдаются на границах зерен в тех местах, где крупные карбиды  $M_{23}C_6$  располагаются в виде цепочек. Шестой тип субструктуры – *субструктура с микропорами*.

Поля внутренних напряжений изучали по параметрам изгибных экстинкционных контуров (контуров изгиба–кручения). Контуров изгиба–кручения наблюдали и измеряли в сетчатой и фрагментированных субструктурах, от карбидных частиц, расположенных на границах фрагментов и от границ фрагментов, внутри крупных карбидных частиц. Выявлена связь плотности контуров изгиба–кручения с длительной прочностью теплоустойчивых сталей.

Установлено, что источниками внутренних (дальнодействующих) полей напряжений в исследуемых сталях являются: (1) – поля, возникающие от дислокационных зарядов в поляризованной дислокационной структуре, т.е. от избыточной плотности дислокаций, внутри сетчатой и фрагментированной субструктур; (2) – несовместность деформаций отдельных фрагментов и зерен (границы фрагментов и зерен); (3) – частицы карбидных фаз, расположенных на границах и в стыках фрагментов; (4) – крупные частицы карбида  $M_{23}C_6$ , находящиеся на границах зерен.

В теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталях амплитуда кривизны–кручения кристаллической решетки изменяется в пределах 500–1800 рад/см. Это – моментные локальные напряжения вблизи источников. Их средняя амплитуда в карбидных частицах колеблется от 340 – 520 МПа до 1000 МПа. При снижении длительной прочности в исследованных сталях обнаружено увеличение величины внутренних полей напряжений.

На основе широкого набора экспериментальных данных по исследованию теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей впервые установлены физические закономерности распространения ПАВ при изменении плотности контуров изгиба–кручения, величины локальных внутренних (дальнодействующих) полей напряжений и длительной прочности. Доказано, что уменьшение плотности контуров изгиба–кручения, значений амплитуды кривизны–кручения кристаллической решетки, величины локальных внутренних напряжений приводит к уменьшению степени ослабления ультразвука и снижению времени задержки ПАВ.

При математическом моделировании для длительно–работающих теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей установлено преимущество показателей времени задержки ПАВ и микротвердости границ зерен, предельно характеризующих состояния металла, доказана высокая степень корреляции ( $r \cong 0,997$ ) времени задержки ПАВ с длительной прочностью.

Разработан комплексный критерий предельного состояния (ККПР) длительно–работающего металла вида  $K_f = \frac{W_\tau - W_0}{W_f - W_0} \cdot \frac{W_f}{W_\tau} \cdot \gamma$ , который определяется

временем задержки ПАВ в металле с исходным состоянием структуры ( $W_0$ ), в металле, исчерпавшем свой ресурс работоспособности ( $W_f$ ) и в контролируемом металле ( $W_\tau$ ). Определены численные значения ККПР для структурных различных состояний исследованных сталей и показано, что при величине критерия  $K_f \geq 0,7$  исследованные стали достигают предельного состояния, характеризующегося наличием в микроструктуре высокой плотности источников внутренних полей напряжений, субструктур с микропорами и микротрещинами.

Полученные физические закономерности положены в основу способа неразрушающего контроля степени поврежденности металла элементов теплоэнергетического оборудования (Патент РФ №2231057) и методики оценки предельного состояния ТУОПО. Результаты научных исследований нашли широкое применение в энергетической, химической, угольной, металлургической и других отраслях промышленности Кузбасса в виде методик, критериев, приборов и баз данных широкого спектра сталей после различных сроков эксплуатации.

### Литература

1. Смирнов, А.Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А.Н. Смирнов, Б.Л. Герике, В.В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.

2. Пат. № №2231057 Российская Федерация. Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования / А.Н. Смирнов, Н.А. Хапонен. – 2004.

3. Смирнов, А.Н. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ / А.Н. Смирнов, Э.В. Козлов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. – 163 с.

УДК 621.791.05:620.179

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТЕЙ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОБЪЕКТАХ КОТЛОАДЗОРА СПЕКТРАЛЬНО–АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Н.В. Абабков, аспирант, А.О. Хасанов, инж., А.А. Качаев, инж.

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово  
Нано-Центр Национального исследовательского Томского политехнического  
университета, (г. Томск, Российская Федерация)

Безопасная эксплуатация технических устройств, применяемых в теплоэнергетической промышленности, относятся к объектам котлонадзора и являются подведомственными Ростехнадзору, является важнейшей задачей. К этим техническим устройствам относятся: котлы паровые, трубопроводы пара, сосу-