

ISSN 1684-5781

# ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный  
научно-технический,  
производственный  
и учебно-методический  
журнал

8/2012



УДК 669.162.214.22

## Техническое диагностирование металлургического оборудования

С.О. Гевлич, Д.С. Гевлич, Я.А. Полонский, С.А. Пегишева

ООО «Экспертиза»

ВолгГТУ

E-mail: sokol@nait.ru

*На примере дуговой печи рассмотрено применение интегральной термографии как универсального метода тотального контроля. Обсуждается вопрос изменения структуры и свойств металлических конструкций, подвергающихся тепловому воздействию. Сделаны выводы о необходимости учета возможных структурно-механических изменений для целей экспертизы промышленной безопасности металлургического оборудования.*

*Ключевые слова: интегральная термография, незаменяемые элементы, температурное поле, тепловизионный контроль, прочностные свойства, микроструктура.*

Экспертиза промышленной безопасности — оценка соответствия объекта экспертизы предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности, результатом которой является заключение экспертизы промышленной безопасности технического устройства. Из данного определения следует, что документом, удостоверяющим соответствие, является экспертное заключение. Сами же оценочные действия эксперта предполагают всесторонний анализ имеющейся в его распоряжении документации. Очевидно, что основной является документация по результатам технического диагностирования объекта экспертизы. Техническое диагностирование позволяет оценить текущее состояние устройства, оценить и спрогнозировать наступление предельного состояния, выбрать критерии для расчета остаточного ресурса.

Основываясь на этих общих принципах, рассмотрим некоторые аспекты технического диа-

гностирования электрометаллургического оборудования и, в частности, дуговых печей.

Объект — дуговая печь — может быть условно разбит на заменяемые элементы (футеровка, электроды, свод и т.п.) и незаменяемые (портал, кожух печи и т.п.). Очевидно, что обсуждение возможного влияния состояния заменяемых элементов на промышленную безопасность и величину остаточного ресурса не является предметом технического диагностирования. Эти части печи должны быть вовремя заменены в соответствии с требованиями технологических регламентов. Эксперту необходимо проверить наличие таковых и их выполнение, что должно отражаться в эксплуатационной документации.

Иное дело незаменяемые элементы. От их состояния будет зависеть продолжительность безопасной эксплуатации печи. В этом смысле особый интерес представляет кожух как элемент печи, обеспечивающий собственно функционирование печи как металлургического объекта.

Кожух подвергается температурному воздействию в течение всего периода плавки от заливки до выпуска жидкого металла. Это воздействие идет с постоянным повышением температуры до некоего максимума и последующим охлаждением до технологического минимума. Очевидно также и неравномерное распределение температуры по всей поверхности печи.

Наиболее эффективным способом технического диагностирования такого объекта будет интегральная термография или тепловизионный контроль.

Для примера на рис. 1 показана термограмма дуговой печи емкостью 10 т. Как видно из рис. 1, кожух нагрет до температуры около 150 °С, причем (рис. 1, а) поверхность вблизи сливного носка имеет ту же температуру, что и кожух со стороны портала (рис. 1, б). Свод, собранный на водоохлаждаемом кольце, имеет более высокую температуру — до 360 °С.

Температурное поле портала (рис. 1, б) имеет температурный максимум 31 °С, который сохраняется в течение всего периода плавки. Этот незаменимый элемент печи не подвержен какому-либо температурному воздействию и работает в условиях статического нагружения.

Водоохлаждаемые элементы (сводное кольцо, дверца завалочного окна, кольцо на кожухе) не подвергаются тепловому воздействию. В среднем их температура не превышает 30 °С. Аналогичное тепловое состояние у механизма опрокидывания.

В печах большей емкости эти закономерности сохраняются, однако значения температурных максимумов может быть другое. Так, обследование дуговой печи емкостью 150 т показало, что температура поверхности кожуха вблизи завалочного окна достигала 350 °С. Это уже достаточно высокая температура, которая способна оказать влияние на изменение как субструктуры (уровень дислокаций), так и микроструктуры (размер ферритного зерна и состояние перлитной фазы).

Тепловизионный контроль оказывается весьма эффективным средством для оценки тако-

го элемента кожуха, как сварной шов. Очевидно, что в тех случаях, когда сварные швы кожухов выполнены с несковозным проплавлением по толщине обечайки (листа), их тепловое сопротивление будет отличаться от основного металла. Это положение наглядно иллюстрирует рис. 2. Термограмма получена при техническом диагностировании стационарного миксера для хранения жидкого алюминия. Как видно из рис. 2, сварной шов имеет более высокую температуру, чем кожух миксера. Именно этот факт позволяет сделать вывод о том, что шов не сплошной, проварен только с одной стороны — снаружи. В подобных случаях нет необходимости в применении ультразвуковой дефектоскопии. Для определения толщины стенки в зоне шва достаточно решить обычное уравнение теплопередачи через плоскую или цилиндрическую стенку и получить значения толщины ( $\delta$ ) или теплового сопротивления ( $\lambda/\delta$ ). Очевидно, что и такие дефекты, как локальное разрушение футеровки, нарушение целостности кладки свода и т.п., также легко определяются рассматриваемым методом.

Применение традиционных методов неразрушающего контроля (УЗД, УЗТ, ВИК и т.п.), конечно, имеет место. Однако сами условия эксплуатации накладывают ограничения на применимость схем контроля. Так, ультразвуковые методы предполагают непосредственный контакт дефектоскописта с поверхностью объекта. Для печи это означает полное охлаждение до нормальной температуры. Такое состояние возможно только

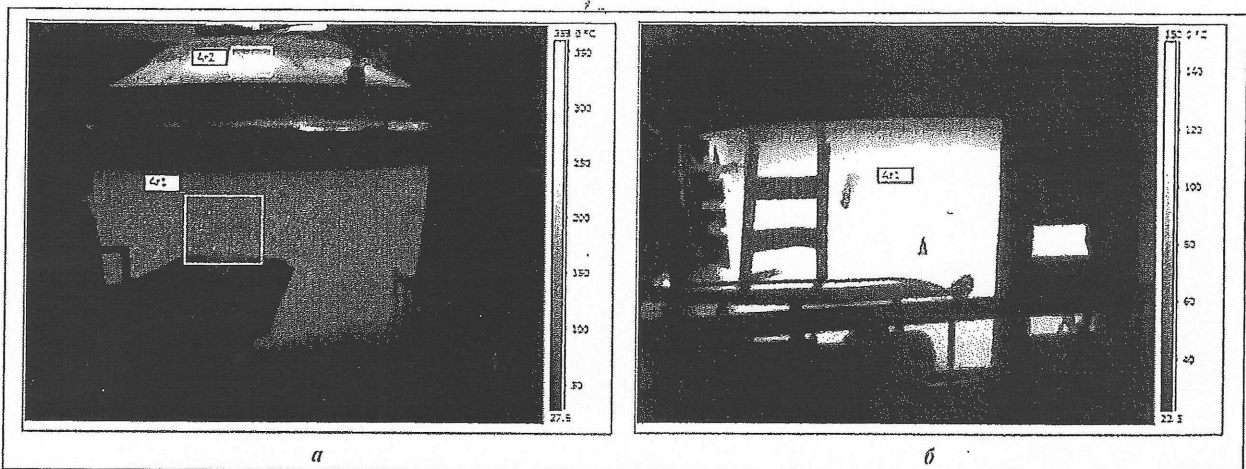


Рис. 1. Термограмма дуговой печи емкостью 10 т:  
а — точка Ar1 — 152,8 °С, точка Ar2 — 360,1 °С; б — точка Ar1 — 143,7 °С

при перенабивке футеровки, что может не совпадать по времени с проведением диагностических работ. В тотальной толщинометрии (УЗТ) нет необходимости, достаточно просто проверки толщины на предмет соответствия фактического исполнения проектному. Аналогично обстоит дело с другими методами, кроме ультразвуковой дефектоскопии (УЗД). Методом УЗД выявляются практически все несплошности (трещины, поры, непровары и т.п.). Однако с позиций разумной достаточности для печей можно ограничиться сканированием т.н. «крестов» — мест пересечения продольных и кольцевых швов. Следует отметить один существенный момент в неразрушающем контроле элементов печей и металлургического оборудования. Если в процессе диагностирования есть уверенность в развитии процесса тепловой хрупкости обследуемого элемента, то необходимо проверить все сварные соединения, включая ремонтные швы, прихваты и т.п., поскольку все эти зоны могут быть источниками магистральных трещин [1].

В этом смысле интегральная термография позволяет наиболее быстро определиться с возможными поврежденными зонами и характером дефектов.

Рассмотрим возможные механизмы деградации свойств металла кожуха под воздействием теплового потока в период плавки.

Наши исследования по оценке деградации прочностных свойств кожухов из стали 09Г2С показали, что при температурах до 473—523 К (200—250 °С) и длительности эксплуатации более 10 лет не выявлено заметное изменение прочностных свойств. Визуально не изменилась и микроструктура стали. Вместе с тем было обнаружено снижение пластических свойств по сравнению с указанными в ГОСТ 5520 [2] почти в два раза. Весьма важным показателем истощения ресурса пластичности металла является отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . По ГОСТ 5520 это отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,66$ . В металле после десяти лет эксплуатации отношение возросло:  $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,76$ . Имеется заметное повышение, что свидетельствует о возможном протекании таких процессов, как старение термическое и термомодеформационное, первые стадии рекристаллизации. Возможны также сегрегационные явления, например образование карбидов как следствие термомодеформационного старения, приводящего к тепловой хрупкости. Эти подходы к описанию деградации предложены в работах [3—5].

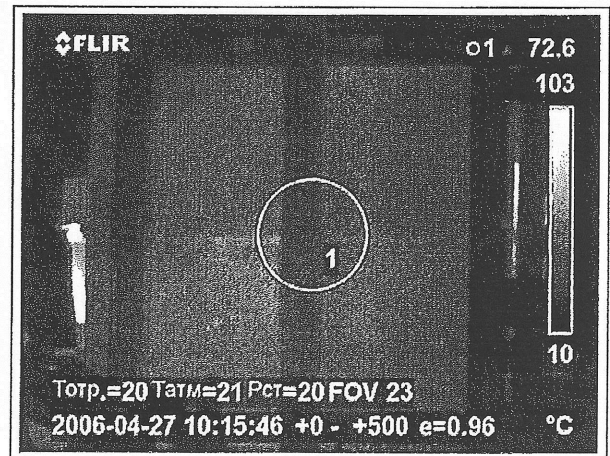


Рис. 2. Термограмма боковой поверхности миксера

В работе [6] предложена методика расчета остаточного ресурса конструкции, работающей в условиях деформационного (термомодеформационного) старения. В качестве критерия предельного состояния использован коэффициент остаточной прочности  $\gamma$  [7]. Расчеты по предложенной методике показывают, что для конструкций из стали типа 09Г2С предельное состояние  $\gamma = 1$  наступает примерно через 30—40 лет непрерывной эксплуатации. Однако более показателен в этом смысле другой критерий — величина температуры вязкохрупкого перехода  $\Delta T_{50}$ . Так, сравнение данных работ [3] и [6] показывает, что  $\Delta T_{50}$  для упомянутой стали может принимать положительные значения уже через 15—20 лет. А это уже нормальный срок эксплуатации такой конструкции как дуговая печь.

Другим возможным механизмом деградации свойств могут быть процессы рекристаллизации феррита и изменений в перлитной фазе. Такой механизм деградации обсуждался в работе [7]. Модельные эксперименты и исследования натуральных образцов стали, подвергнутой длительному тепловому воздействию, показывают, что имеет место частичная рекристаллизация феррита. Причем для малоуглеродистых сталей преимущественно идет процесс роста, а для низколегированных сталей — образование новых зерен. С точки зрения возможного изменения механических свойств следует отметить, что формирование разнотекстурной структуры приводит к значительному увеличению коэффициента вариации, например, предела текучести. Следовательно, механичес-

кие свойства, стали длительно эксплуатирующиеся кожуха дуговой печи оказываются весьма неоднородными по всему периметру конструкции. Эта степень неоднородности будет тем больше, чем больше разница в температурных максимумах и минимумах по объекту.

### Заключение

В заключение следует отметить, что рассмотренный модельный объект — дуговая печь — является типичным представителем объектов экспертизы промышленной безопасности в металлургической промышленности. Рассмотренная в настоящей работе методология диагностирования может быть представлена как сочетание тотального контроля (интегральная термография) и локального контроля (металлофизические исследования участков, наиболее подверженных тепловому воздействию). В этом сочетании применение современных методов технического диагностирования наряду с традиционными, привлечение металлофизических исследований позволяет не просто обсуждать состояние технического устройства, но и решать задачу энергоэффективности эксплуатации оборудования, принимать адекватные критерии перехода в предельное состояние и, наконец, обсуждать само предельное состояние как следствие деградиционных процессов в металле.

### Список литературы

1. **Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р.** Техническое состояние и остаточный ресурс конструкций, испытывающих деградацию механических свойств стали // Материалы международной научно-технической конференции «Экспертиза и оценка риска техногенных систем». Череповец: ЧГУ, 2011. С. 37—43.
2. **ГОСТ 5520.** Прокат листовой из углеродистой низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия.
3. **Горицкий В.М.** Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
4. **Горицкий В.М.** Тепловая хрупкость сталей. М.: Металлургиздат, 2007. 384 с.
5. **Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Маслов Л.И.** Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической микротвердости. М.: Интерконтакт Наука, 2004. 70 с.
6. **Гевлич С.О., Полонский Я.А.** Расчет остаточного ресурса статически нагруженных конструкций в условиях эксплуатационного старения // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 3. С. 51—53.
7. **Ячинский А.А.** Влияние структурно-фазового состава трубных сталей и их сварных соединений на сопротивление деформационному старению: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / РГУ Ниг им. И.М. Губкина. М., 2006.