

УДК 621. 318. 38

Прядченко Д. В.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ БАРАБАНОВ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

В данный период специалисты признают, что состояние теплоэнергетического оборудования Украины, паровых котлов в особенности, приблизилось к критическому, что ослабляет энергетическую безопасность и независимость страны. Поскольку значительная часть объединённых в энергетическую систему энергоблоков (~ 54 %) эксплуатируется около $2 \cdot 10^5$ часов [1]. Такой глобальный износ теплоэнергетического оборудования, в особенности паровых котлов, ставит актуальную задачу определения остаточного ресурса оборудования и путей продления срока дальнейшей эксплуатации.

Для этого необходимо реальное исследование технического состояния котельного оборудования и, в зависимости от результатов исследования, разработать комплекс мероприятий направленный на продление и повышение надёжности его эксплуатации. Одним из важнейших шагов такого исследования является определение состояния металла эксплуатируемого оборудования, который подвергается совместному влиянию целого ряда технологических факторов, которые приводят к деградации металла. К ним относят водородосодержащую среду и тяжёлые температурно-силовые условия эксплуатации (температура, давление). Кроме того, в последнее время специалисты-эксплуатационщики определяют одной из главных причин утраты работоспособности котельного оборудования частые остановы котлоагрегатов из-за эксплуатации в не непрерывном режиме. Нагревание и охлаждение во время остановов, зачастую форсированных, сопровождается возникновением дополнительных термических напряжений в сечении металла, которые совместно с напряжениями от внутреннего давления могут, в отдельных местах, достигнуть критических значений [2, 3]. Это облегчает зарождение и распространение трещин в металле элементов котла, интенсифицированного вредным влиянием абсорбированного металлом водорода, и приводит к очевидной деградации в виде повреждений в конструкции, которые распространяются вплоть до окончательного разрушения. Этому, относительно быстрому этапу деградации, предшествует значительно более медленный этап, который необязательно связан с дефекто- или трещинообразованием, а проявляется в изменении субструктуры, микроструктуры и, как следствие, ухудшение механических свойств метала [4–6]. При этом, при сохранении целостности конструкции, металл длительно эксплуатируемых элементов котельной установки теряет свойства, которые гарантировали ему работоспособность в начале эксплуатации. Важную роль в этом процессе играет водородное охрупчивание. Поскольку концентрация водорода в таком металле выше, чем в исходном «здоровом» металле, и распределён он неравномерно [7]. Экспериментально установлено, что растворённый в металле водород ускоряет диффузионное перераспределение легирующих элементов [8, 9], интенсифицируя структурные изменения, а скорость перераспределения зависит от температуры металла и от нагрузок [10, 11]. Поэтому изменения микроструктуры металла во время длительной высокотемпературной эксплуатации ускоряется из-за влияния обогащения водородом и дополнительных напряжений, которые возникают во время пусков-остановов, зачастую форсированных, котлоагрегатов. При этом сокращается этап деградации металла на структурном уровне с соответствующим изменением механических свойств, и уже как следствие – зарождение трещин и снижение долговечности конструкции [12].

Целью данного исследования является установление корреляционных зависимостей между режимом технической эксплуатации паровых котлов малой и средней мощности

и магнитными свойствами сталей их основных элементов – барабанов. Установленные зависимости между режимом и условиями эксплуатации, с одной стороны, и механическими свойствами и структурно-фазовым состоянием, с другой, свидетельствуют о такой зависимости.

Опыт технического диагностирования металлоконструкций многих типов, в том числе и котельных агрегатов, в разных отраслях техники свидетельствует, что такая магнитная характеристика металла, как коэрцитивная сила (H_c), является эффективным параметром контроля накопления поврежденности на микроуровне (т. е. в ещё бездефектном для дефектоскопии состоянии металла). Для металлоконструкции, работающей в режиме малоциклового усталости (МЦУ), величина H_c возрастает в два-три раза – от H_{c_0} до H_c^B , пока металл проходит путь от нового в состоянии поставки до состояния начала интенсивного дефектообразования. Причём зоны, в которых происходит такое накопление усталостных повреждений, большие, логически предопределены и потому легко обнаруживаются. Количественно степень поврежденности контролируется быстро и просто по величине $H_{c_{текущ}}$, а точнее, по степени продвинутости измеренного значения $H_{c_{текущ}}$ от исходной величины H_{c_0} к предельному значению H_c^B [13, 14]. При этом оценка не зависит от того, какой эксперт и каким прибором проводил измерения. Необходимо отметить, что величины H_{c_0} и H_c^B – характерные константы для каждой марки стали, определяемые в процессе стендовых испытаний, а в режиме МЦУ работает абсолютное большинство оборудования, контролируемое технадзором.

Специалистами «Центра диагностики и аттестации оборудования производств спецхимии и боеприпасов» были обследованы барабаны паровых котлов БГ-35 и ГМ-50-1 установленных в теплосиловом цехе Рубежанского государственного предприятия «Химический завод «Южный» (ГП ХЗ «Южный»). Оба котла, БГ-35 ст. № 6 и ГМ-50-1 ст. № 11, предназначены для снабжения производств завода паром и работают на природном газе. Данные котлов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых котлов

№	Параметр котла	Тип котла	
		БГ-35	ГМ-50-1
1	Дата ввода в эксплуатацию	1965 г.	1984 г.
2	Срок эксплуатации	45 лет	26 лет
3	Производительность	35 т/час	50 т/час
4	Температура пара на выходе	450 °С	440 °С
5	Давление в барабане	44 кгс/см ²	44 кгс/см ²
6	Сталь барабана	20К	20К
7	Завод изготовитель	«Энергомаш», г. Белгород	
8	Толщина стенок барабана	40 мм	40 мм

Из приведенных в табл. 1 основных характеристик видно, что основные параметры котлоагрегатов одинаковы или отличаются незначительно. Влияние различной производительности котлов на состояние металла барабана не учитывалось.

В связи с всеобщим спадом производства, остановкой производств, снизилась паровая нагрузка теплосилового цеха. Из 11 установленных в теплосиловом цехе котлов, 6 были выведены из эксплуатации. Котёл ГМ-50-1 ст. № 11 работал в нестабильном, кратковременном

режиме, в период работы энергоёмких производств завода и возрастания паровой нагрузки. В среднем коэффициент загрузки котельной установки, исходя из технической документации, может быть принят равным $K_3 = 0,42$.

Паровой котёл БГ-35 ст. № 6, попал в группу котлов работающих в длительном, паспортном режиме. Остановы котла производились согласно графику для проведения плановых ремонтов, профилактики и диагностирования. Средний коэффициент загрузки котельной установки, исходя из технической документации, может быть принят равным $K_3 = 0,95$. Фактический срок эксплуатации котлов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Срок эксплуатации котлоагрегатов

№	Тип котла	Срок, лет	K_3	Срок, тыс. часов	Режим эксплуатации
1	БГ-35	45	0,95	373,46	Длительный
2	ГМ-50-1	26	0,42	95,4	Кратковременный

В течение 2010 года оба котла были остановлены на плановый ремонт и профилактику, в ходе которой было проведено техническое диагностирование котлов. Диагностирование проводилось в соответствии с программой и требованиями, приведенными в [15]. В ходе диагностирования барабанов котлов, для получения общей картины состояния металла барабанов, был применён нерегламентированный в [15] метод неразрушающего контроля – магнитный (коэрцитиметрический) метод. Поскольку в программе диагностирования паровых котлов коэрцитиметрический метод отсутствует, то при проведении обследования барабанов были использованы рекомендации и требования [16]. Коэрцитиметрической диагностике были подвергнуты трубные доски, места приварки внутрибарабанных устройств, основной металл обечайки и обоих днищ. Усреднённые значения замеров коэрцитивной силы приведены в табл. 3.

Таблица 3

Величина коэрцитивной силы металла барабана котла, А/см

№	Зона замеров	Тип котла	
		БГ-35	ГМ-50-1
1	Трубные доски	3.93	3.81
2	Места приварки внутрибарабанных устройств	4.1	3.97
3	Основной металл обечайки	3.7	3.64
4	Основной металл днища № 1	3.52	3.41
5	Основной металл днища № 2	3.49	3.38

Замеры коэрцитивной силы проводились портативным коэрцитиметром КРМ-Ц-К2М, изготовленным компанией «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков).

Из результатов проведенных магнитных исследований видно, что уровень коэрцитивной силы металла повысился относительно исходного, не эксплуатируемого, состояния ($H_{C_{20K}}^0 = 2,0 \div 2,5$ А/см для стали 20К при толщине 40 мм). Что свидетельствует о протекающих усталостных процессах в металле барабанов. Уровень коэрцитивной силы металла барабана котла ГМ-50-1 приближается к уровню металла барабана котла БГ-35, не смотря на значительную разницу в сроке эксплуатации. Ускоренные процессы старения металла, повышенный уровень концентрации напряжений можно объяснить кратковременным, нестабильным

режимом работы, по сравнению с котлом БГ-35, частыми пусками и остановами, которые зачастую проводились в форсированном режиме в связи с пуском энергоёмких производств и необходимостью их обеспечения паром.

Данный факт вызвал интерес. Результаты коэрцитиметрических исследований были проверены металлографическим методом. Подтверждения магнитных исследований, путём вырезки образцов и лабораторных исследований на микроскопах МИМ – 7 и МИМ – 8 и фотографировались цифровой фотокамерой с большим разрешением. После механической шлифовки образцы травились в 4 % процентном растворе азотной кислоты в спирте [17]. Образцы, по которым изучалась структура основного металла барабанов обоих котлов, вырезались из демонтированных в ходе ремонта элементов барабана, что большого труда не вызвало. Металлографические исследования проводились в лаборатории металлов ГП ХЗ «Южный». Структуры металлы приведены на рис. 1–2.

Микроструктура основного металла «здоровой» зоны барабана котла БГ-35 состоит из феррита и перлита с соотношением 70 % и 30 %. Величина зерна соответствует 8 баллу [18]. Перлит имеет плотное строение. У внутренней поверхности на половине сечения наблюдается полосчатое строение, оцениваемое 2 баллом [19] (рис. 1). Наряду с равноосными имеются вытянутые зёрна, наблюдается некоторая разноразмерность. У наружной поверхности барабана расположена равномерная ферритно-перлитная структура, количество неметаллических включений и сульфидов не превышает 1 балл [18].

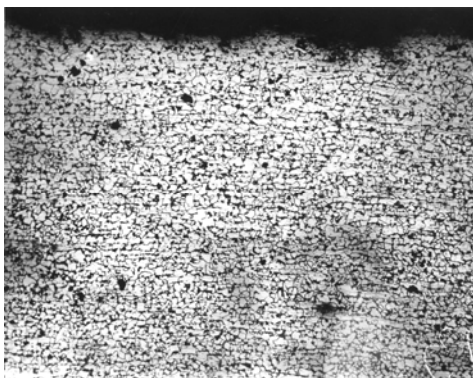


Рис. 1. Микроструктура металла барабана котла БГ-35 (сталь 20К × 100)

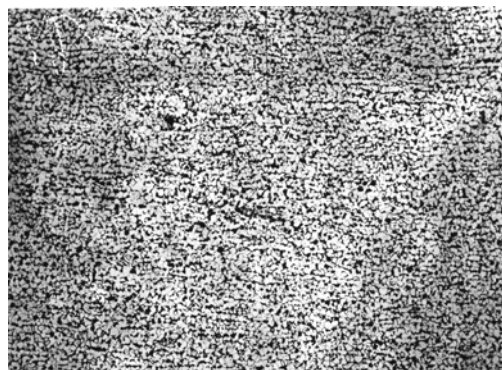


Рис. 2. Микроструктура металла барабана котла ГМ-50-1 (сталь 20К × 100)

Микроструктура основного металла «здоровой» зоны барабана котла ГМ-50-1 аналогична структуре основного металла «здоровой» зоны барабана котла БГ-35. Величина зерна соответствует 9 баллу [18], полосчатость с внутренней поверхности распространяется на большее расстояние – 2/3 сечения (рис. 2).

Таким образом, структуры металла барабанов котлов БГ-35 и ГМ-50-1, проработавших 45 и 26 лет соответственно, практически идентичны, что подтверждает влияние режима работы котлоагрегатов на структурно-фазовое состояние, механические свойства и, как следствие, магнитные свойства сталей барабанов.

ВЫВОДЫ

В ходе технического диагностирования барабанов паровых котлов БГ-35 и ГМ-50-1 были достигнуты следующие результаты:

1. Была доказана состоятельность коэрцитиметрического метода неразрушающего контроля для диагностирования котельного оборудования и определения усталостного состояния металла, подтверждающая высокую корреляцию изменений структурно-фазового состояния металла барабана парового котла и его магнитной характеристики – коэрцитивной силы, что было подтверждено металлографическими исследованиями.

2. Практически было доказано влияние технологического режима эксплуатации, а также его нарушение, парового котла на усталостное состояние и структуру металла его основного элемента – барабана, и, как следствие, на магнитные характеристики металла – коэрцитивную силу.

3. Измеряемая величина H_c легко выполняется на практике рядовым персоналом при минимальном обучении, значительно увеличивая объём обследованного металла элемента котлоагрегата.

4. Магнитный (коэрцитиметрический) метод неразрушающей диагностики облегчает и упрощает программу технического диагностирования котельных установок, сокращая объём дефектоскопии классическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забара Ю. Вихід завжди є [Електронний ресурс] / Ю. Забара // Обрій ПІБ. – 2002. – № 24 (8). – Режим доступу: <http://www.obriv.pib.com.ua>.
2. Візак В. М. Оптиміальне управління нестационарними температурними режимами / В. М. Візак. – Наук. думка, 1979. – 360 с.
3. Panasyuk V. V. *Strength and Fracture of Solids with Cracks* / V. V. Panasyuk. – Lviv: NASU, Karpenko Physico – Mechanical Institute, 2002. – 468 p.
4. Крутасова Е. И. Надёжность металла энергетического оборудования / Е. И. Крутасова. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 240 с.
5. Березина Т. Г. Структурный метод определения остаточного ресурса длительно работающих паропроводов / Т. Г. Березина // Теплоэнергетик. – 1986. – № 3. – С. 53–56.
6. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропроводів сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О. М. Романів, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 1. – С. 101–104.
7. Вайнман А. Б. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления / А. Б. Вайнман, Р. К. Мелехов, О. Д. Смиян. – К. : Наук. думка, 1990. – 272 с.
8. Ускорение процессов самодиффузии в металлах под влиянием растворённого водорода / В. М. Сидоренко, В. В. Фёдоров, Я. В. Барабаш, В. И. Похмурский // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – № 6. – С. 27–30.
9. Похмурський В. І. Вплив водню на дифузійні процеси метала / В. І. Похмурський, В. В. Федорів. – Львів : Еней, 1998. – 207 с.
10. Студент О. З. Особливості впливу водню на порогові характеристики циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей / О. З. Студент // Машинознавство. – 1999. – № 2. – С. 17–23.
11. Студент О. З. Вплив водню на механічні властивості реакторної сталі 15Х2МФ / О. З. Студент // Машинознавство. – 1999. – № 4. – С. 23–29.
12. Оцінювання впливу зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Г. В. Кречковська, А. Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 42–55.
13. Безлюдько Г. Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлоконструкций неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / Г. Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 20–26.
14. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы металла / Г. Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 1. – С. 20–22.
15. Котлы паровые и водогрейные промышленных предприятий. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию) [Регистрационный № 220]. – Харьков, 2006. – 401 с.
16. ГОСТ 30415-96 «Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры магнитным методом». – ИПК Изд. стандартов : Москва, 1997. – 19 с.
17. Коваленко В. С. Металлографические реактивы [изд. 3-е перераб. и доп.] / В. С. Коваленко. – М. : Металлургия, 1981. – 120 с.
18. ГОСТ 5639-82 «Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». – ИПК Изд. стандартов : Москва, 2003. – 38 с.
19. ГОСТ 5640-68 «Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты». – Изд. стандартов : Москва, 1988. – 18 с.