УДК 621.791.05:620.179

А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, СВЯЗАННЫХ С БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В процессе эксплуатации элементов технических устройств опасных производственных объектов (ТУ ОПО) энергетической промышленности возникает целый ряд проблем, которые могут привести к техногенным катастрофам и человеческим жертвам.

В первую очередь, это связано с тем, что большая часть оборудования (85-90%) выработала свой ресурс и нуждается в полной или частичной замене. Однако, современное состояние экономики в теплоэнергетической промышленности не позволяет достичь поставленных целей. Поэтому весьма актуальным становится вопрос разработки новых, эффективных технологий, методов и способов оценки работоспособности и восстановления ресурса элементов технических устройств. И для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных конструкций все более широкое распространение получает концепция, основанная на «прогнозировании и предупреждении» вместо используемой старой концепции «обнаружение и устранение» [1].

Объектом исследований данной статьи являются барабаны паровых котлов типа ПК-10. Принципиальная схема парового котла представлена на рис 1.

На данный момент в России эксплуатируется около 50 котлоагрегатов данного типа. При этом срок эксплуатации некоторых из них достиг 60 лет. Один из таких паровых котлов ПК-10 эксплуатируется на Южно-Кузбасской ГРЭС. Барабан котла имеет размеры ∅1490х95 мм, давление в барабане – 110 кгс/см^2, температура – 316 °С, дата изготовления 1950 г., дата пуска 1951 г., время эксплуатации – 320033 час.

Материал, из которого изготовлен барабан – специальная молибденовая сталь 16М. Химический состав представлен в табл. 1.

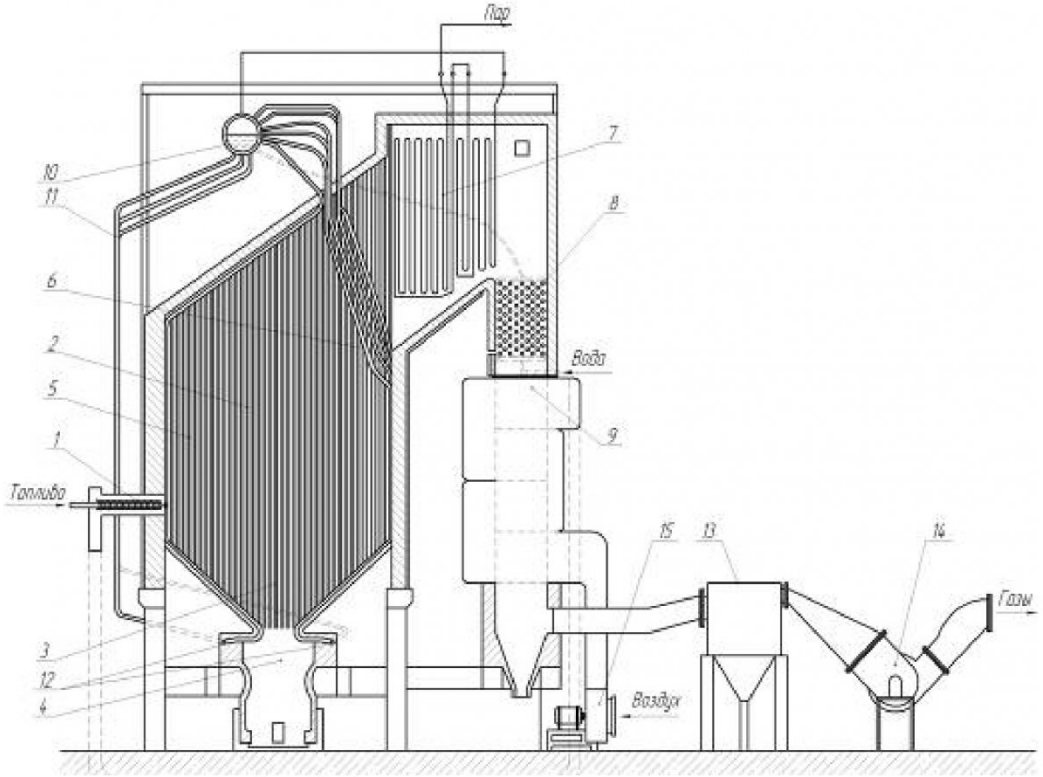

Рис. 1. Принципиальная схема парового котла.
1 – горелка; 2 – топочная камера; 3 – холодная воронка; 4 – шлаковый комод; 5 – экраны; 6 – фестон; 7 – пароперегреватель; 8 – экономайзер; 9 – воздухоперегреватель; 10 – барабан котла; 11 – опускные трубы; 12 – коллекторы; 10 - барабан котла; 11 – опускные трубы; 12 – коллекторы; 13 – золоуловитель; 14 – дымосос; 15 – дутьевой вентилятор.

Таблица 1.Химический состав стали 16М, ГОСТ 4543-57

C, %	Si, %	Mn, %	Mo, %	S, %	P, %
0,13-0,19	0,17-0,37	0,4-0,7	0,4-0,55	Не более 0,035	Не более 0,035

Молибденовые стали, в частности марки 16М (введена взамен марок 15М и 20М), обладают высокими технологическими свойствами: высокой деформационной способностью, хорошей свариваемостью и простотой термической обработки. Поэтому они хорошо зарекомендовали себя при изготовлении сварных барабанов. Недостатком данной стали является склонность ее к сфероидизации цементита и графитизации.

Стали перлитного класса применяются в котлостроении чаще всего в отожженном состоянии, и перлитные зерна в них имеют пластинчатое строение. Однако пластинчатый перлит является нестабильной структурой, поэтому пластинки цементита в процессе длительной (десятки тысяч часов) работы стали при высоких температурах (450-600° С) имеют тенденцию к коалесценции. Это явление, также известное под названием сфероидизации цементита, схематически изображено на рис. 2.

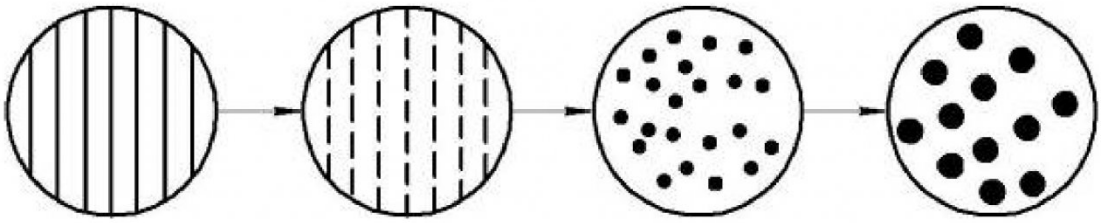

Рис. 2. Схема превращения пластинчатого перлита

Этот процесс выглядит следующим образом: сначала происходит деление пластинок на отдельные глобулы, которые затем принимают округлую форму, а входивший в состав перлита феррит диффундирует в чисто ферритные зерна. Мелкие частицы с течением времени объединяются в более крупные (коагулируют). Процесс сфероидизации приводит к снижению прочности стали и особенно сопротивления ползучести [2].

К 1960 году применение стали 16М в котлостроении было прекращено из-за её склонности к графитизации. Вместо нее для изготовления барабанов котлов стала применяться сталь 15МХ [6]. Поэтому сталь 16М не присутствует ни в одном современном марочнике сталей.

Поскольку данная сталь склонна к механическому старению, то в процессе эксплуатации в сварных соединениях и в основном металле барабанов котлов высокого давления возможно возникновение повреждений следующих типов [4]:

- Повреждения в цилиндрической части (цепочки язвин, раковины, трещины на поверхности трубных отверстий и прилегающих к ним участках внутренней поверхности барабана (рис.

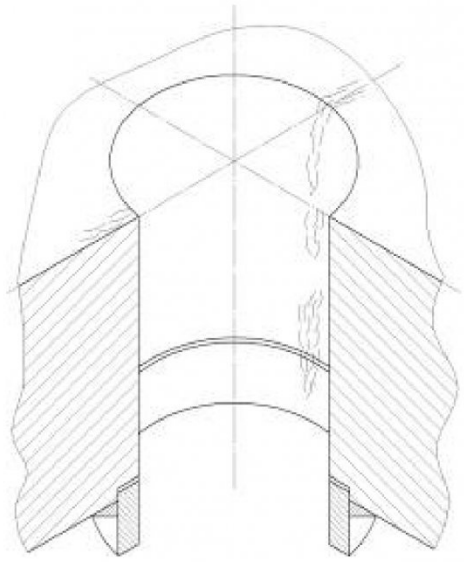

Рис. 3. Трещины в зоне трубного отверстия.

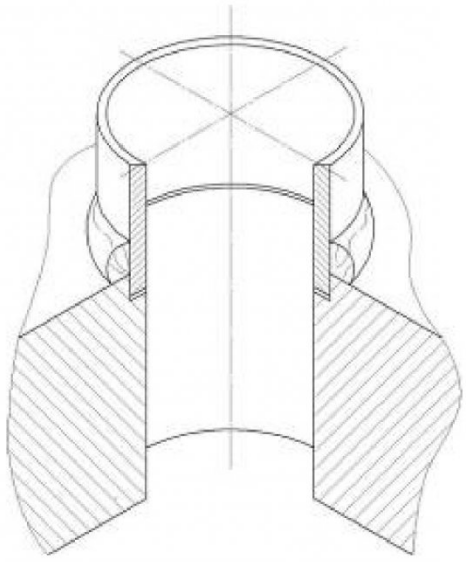

Рис. 4. Трещины в сварном шве приварки штуцера к барабану.

3));

- Повреждения в зонах приварки водоопускных труб (трещины на внутренней поверхности в зоне примыкания к барабану (см. рис. 3); трещины в сварном шве приварки штуцера к барабану (рис. 4)).

Для обнаружения этих и других дефектов используют различные методы испытаний, которые делятся на две большие группы[3]:

- Разрушающие методы исследований;
- Неразрушающие методы исследований.

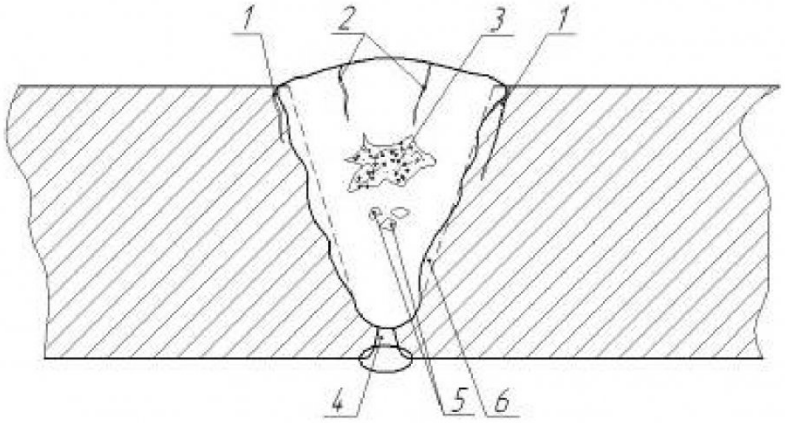

Рис. 5. Дефекты в сварном соединении.
1 – трещины в околошовной зоне; 2 – трещина в шве; 3 – флюсовое включение в шве; 4 – непровар; 5 – шлаковые включения в шве; 6 –несплавление кромок.

- Повреждения в основных (продольных и кольцевых) сварных соединениях барабанов (трещины в наплавленном металле и околошовной зоне; непровары, шлаковые включения и другие технологические дефекты сварки (рис. 5)).

К разрушаемым методам исследований относятся испытания на разрыв, испытания на ударную вязкость, анализ на содержание карбидов и металлографические испытания [5]. Схема вырезки образцов для этих испытаний представлена на

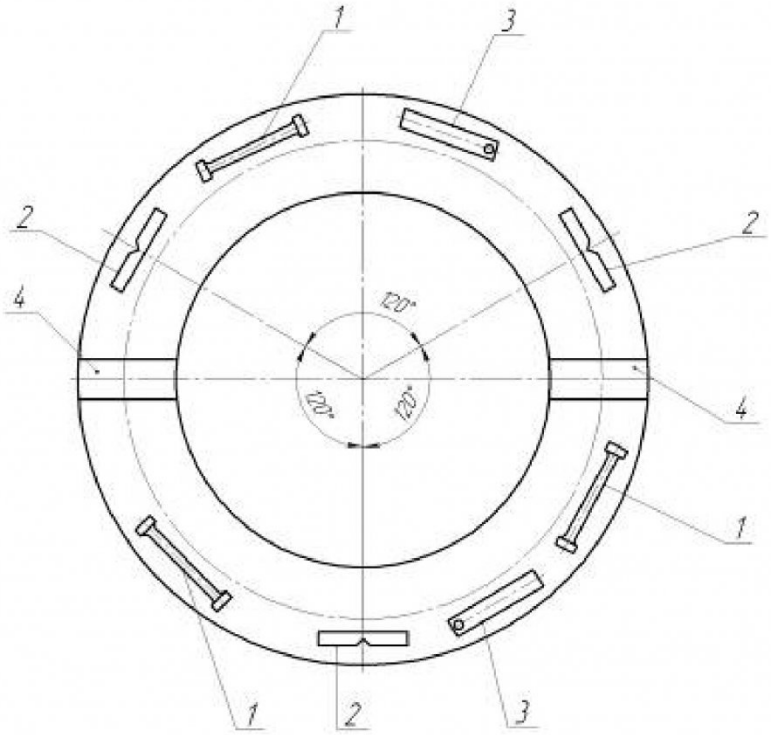

Рис. 6. Схема вырезки образцов.
1 – образцы для испытания на разрыв; 2 – образцы для испытания на ударную вязкость; 3 – образец для карбидного анализа; 4 – образец для металлографического анализа.

рис. 6.

Главным недостатком вышеперечисленных методов является то, что для проведения эксперимента необходимо выводить из строя оборудования, и останавливать, таким образом, производство.

Поэтому в целях обнаружения дефектов в производственных условиях и без выхода из строя оборудования применяют различные методы неразрушающего контроля:

- Визуально-измерительный;
- капиллярный;
- акустический;
- вихретоковый;
- магнитный и др.

Для большинства современных методов неразрушающего контроля и применяемых в них приборах важны, так называемые, корреляционные зависимости. Если мы знаем характеристики металла, находящегося в предельном состоянии (величина остаточных напряжений, величина предела текучести) и значения характеристик, полученных на различных приборах (время задержки и скорость распространения импульсов поверхностных акустических волн – спектрально-акустический метод; интенсивность магнитного шума – магнитно-шумовой метод) для этого же состояния, то можно построить зависимость и вывести закономерности. Которые потом, при наличии большого объема проведенных экспериментов и хорошей сходимости результатов, можно будет использовать как самостоятельные методы.

При этом одним из наиболее перспективных методов контроля состояния металла сварных соединений, основного металла и выявления несплошностей в настоящее время считается акустический метод. Ранее авторами [7-10] было установлено, что спектрально-акустический метод контроля является чувствительным методом оценки локальных полей внутренних напряжений и параметров микроструктуры (плотности дислокаций, кривизны-кручения кристаллической решетки и т.д.). Кроме того, акустические характеристики материалов (скорость распространения упругих волн, затухание и дисперсия, акустический импеданс) имеют связь с механическими свойствами материалов. Это позволяет по акустическим характеристикам материала судить о его механических свойствах. Авторами [7-10] предложены комплексные критерии степени поврежденности металла в относительных единицах. Однако, исследования проводились лишь для паропроводов, изготовленных из различных теплоустойчивых сталей перлитного класса. Есть интерес провести подобные исследования для металла барабана котла.

После нахождения и устранения дефектов производится ремонт и восстановление формы барабана. К наиболее часто используемым методам восстановительного ремонта относятся:

- Ручная дуговая наплавка без термической обработки;
- Ручная дуговая наплавка с термической обработкой;
- Автоматическая наплавка под флюсом;
- Восстановительная термическая обработка.

В работе [11] рассмотрен вариант ремонта барабана котла высокого давления ручной дуговой наплавкой с применением электродов типа Э- 46А марки УОНИ 13/45 с проведением термической обработки. Заполнение выборки кольцевых швов начинали с участков имеющих наибольшую глубину и выравнивали её наплавкой до 40 мм толщины шва. Оставшаяся часть выборки заполнялась двухслойной наплавкой способом каскада, по четвертям кольцевого шва. На заключительном этапе наплавки выполнялась заварка центральной части выборки, в виде стыкового шва и наплавлялись отжигающие валики. Предварительный и сопутствующий подогрев, наплавка и термообработка выполнялись в непрерывном режиме. Режимы термической обработки: температура предварительного подогрева 200 °С, сопутствующего – 620-650 °С, с последующим естественным охлаждением. Перепад температур по толщине стенки барабана не превышала 20 °С при подогреве и 30 °С при термообработке.

Тем не менее, известен ряд случаев, когда восстановительный производился ручной дуговой наплавкой без термической обработки. Во всех этих случаях, после ремонта при проведении гидравлических испытаний, барабаны выходили из строя.

Особый интерес представляет способ автоматической наплавки под флюсом. Этот способ был предложен компанией ООО "Уралэнергоремонт" (рис. 7). Согласно [4] наплавку трубных отверстий барабанов допускается производить без последующей термообработки. Наплавка выполняется автоматической сваркой под слоем флюса АН-60 проволокой Св-08Г2С диаметром 1,4-2,0 мм. Наплавка проводится сварочной головкой *3* кольцевыми валиками с перекрытием предыдущего на 1/3 ширины валика. При глубине выборки на поверхности отверстия не более 20 мм и длине не более 50 мм наплавка может быть местной (ограниченной зоной выборки), с выходом концов валиков на 10-15 мм за границы выборки. Наплавка предварительно проточенных отверстий проводится по всему периметру не менее чем в три слоя на подкладном кольце *4*, которое после наплавки удаляется. Однослойная наплавка не допускается. При данном способе восстановления достигается высокое качество получаемого наплавленного металла с уменьшением количества дефектов.

Таблица 2.Типовые режимы восстановительной термической обработки для труб из стали 16М

Способ нагрева	Нормализация		Отпуск	
	Температура, °С	Время, мин	Температура, °С	Время, мин
Печной	920-950	60	–	–
Индукционный	920-960	30	–	–

Недостатком данного метода является то, что выборка осуществляется по всему диаметру отверстия, что не совсем благоприятно как с экономической, так и с конструкционной точки зрения. Потому что удаляется большое количество бездефектного металла, и увеличивается время на обработку отверстия после наплавки.

Восстановительная термическая обработка – это способ обеспечения высокой эксплуатационной надежности длительно-эксплуатируемого оборудования. Применительно к элементам энергетического оборудования из перлитных жаропрочных сталей восстановительная термическая обработка представляет собой режим термической обработки с полной фазовой перекристаллизацией (табл. 2).

С помощью восстановительной термообработки достигается устранение глубоких изменений структуры и свойств металла паропроводов, происшедших в процессе длительной эксплуатации под воздействием высоких температур и напряжений.

Восстановительная термообработка позволяет регенерировать структуру и свойства длительноработающего металла, когда металл не может обеспечить дальнейшую надежную эксплуатацию

. Этот метод можно применять для регенерации структуры и свойств металла элементов котлов, которые эксплуатировались при температурах выше расчетных и выработали досрочно ресурс.

На основании общих представлений о превращениях, происходящих в перлитных сталях при нагреве и охлаждении, следует ожидать, что перевод легирующих элементов из карбидов обратно в твердый раствор и получение оптималь-

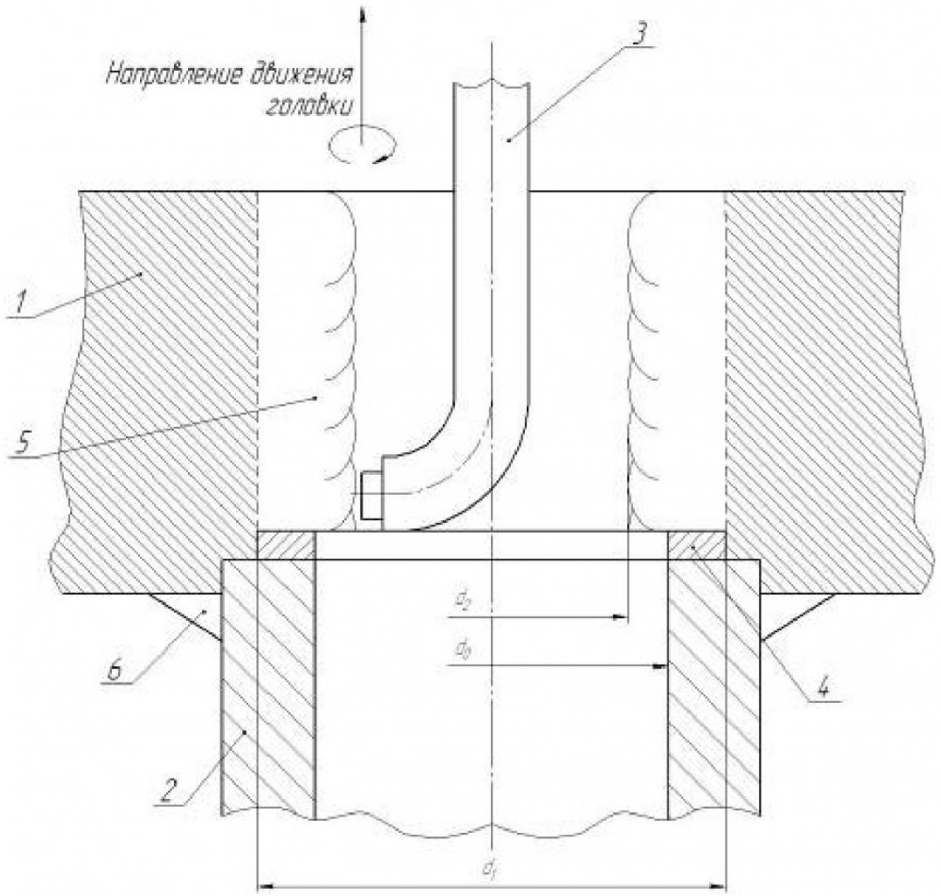

Рис. 7. Схема восстановительной наплавки водоопускного отверстия барабана котла по технологии "Уралэнергоремонт": 1 – корпус барабана; 2 – штуцер; 3 – сварочная головка; 4 – подкладное кольцо; 5 – наплавленный металл; 6 – сварной шов.

ной структуры возможны при нагреве до температуры выше точки *Асз,* выдержке при этой температуре, охлаждении с заданной скоростью и при последующем отпуске.

Однако достаточно полных исследований механизма фазовых превращений в долго работавшем металле до настоящего времени проведено не было[6]. К тому же, данный метод имеет место там, где еще не произошло разрушение. В случаях же с разрушением, необходимо производить восстановительную наплавку.

Выводы и направления дальнейших исследований

1. Огромное количество энергетического оборудования (85-90%) отработало свой расчетный срок и нуждается в полной или частичной замене.
2. Существует целый ряд проблем, связанных с безопасной эксплуатацией энергетического оборудования. Необходимо разработать комплексный подход к оценке состояния и восстановления работоспособности этого оборудования.
3. Установить корреляционные зависимости между характеристиками, получаемыми приборами неразрушающего контроля и реальным состоянием длительно-работающего металла.
4. Провести апробацию комплексных критериев степени поврежденности металла применительно к металлу барабана котла ПК-10 (сталь 16М).
5. Провести ряд экспериментальных исследований по обоснованию рационального выбора того или иного метода восстановления структуры, свойств и форм барабанов котлов высокого давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махненко, В.И.* Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных соединений / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, О.И. Олейник // Автоматическая сварка, 2008, №5. – С.5-10.
2. *Стырикович, М.А.* Котельные агрегаты / М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов // М: Госэнергоиздат, 1959.-488 с.
3. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2006. – 368с.
4. СО 153-34.26.608-2003. Инструкция по обследованию и технологии ремонта барабанов котлов высокого давления.
5. СТО-021-21-21-2003. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов тепловых электрических станций. Контроль состояния металла. Нормы и требования.
6. *Антикайн, П.А.* Металлы и расчет котлов и трубопроводов. – 3-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 365 с.
7. *Смирнов, А.Н., Хапонен, Н.А.* Способ неразрушающего контроля степени поврежденности металлов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования». Патент РФ, №2231057. 2004.
8. *Смирнов, А.Н.* Повреждаемость сварных соединений. Спектрально-акустический метод контроля / А.Н. Смирнов, Н.А. Конева, Н.А. Попова, С.В. Фольмер, Э.В. Козлов // М.: Машиностроение, 2009. – 278с.
9. *Смирнов, А.Н.* Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности / А.Н. Смирнов, В.В. Муравьев, С.В. Фольмер // Контроль. Диагностика. – 2009. – №1. – С.22 – 32.
10. *Смирнов А.Н.* Локальные поля напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению / А.Н. Смирнов, С.В. Фольмер, Н.В. Абабков // Вестн. Кузбасского гос. техн. унив., 2009, №3. С. 28-38.
11. *Смирнов А.Н.* Опыт ремонта барабана из специальной молибденовой стали котлоагрегата ПК-10 / А.Н. Смирнов, В.Л. Князьков, Н.М. Макаров и др. // Электрические станции, 2003, №6. С. 17-22.

Авторы статьи:

Смирнов
Александр Николаевич
- докт. техн. наук, проф. каф. технологии машиностроения КузГТУ
Тел. (384-2) 36-45-27

Абабков
Николай Викторович
- инженер каф. технологии машиностроения, аспирант КузГТУ
Тел. 8-904-994-3154
Email: n.ababkov@rambler.ru.