

На правах рукописи

Улановский Анатолий Александрович

**МЕТОДИКА И СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПЕЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕТАЛЛУРГИИ**

Специальность 05.11.01 Приборы и методы измерения по видам измерений
(измерения тепловых величин)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск – 2017 г.

Работа выполнена в Акционерном обществе Государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Научный руководитель: **Асхадуллин Радомир Шамильевич**
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Отделения физико-химических технологий по науке и технологиям АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Официальные оппоненты: **Соколов Николай Александрович**
доктор технических наук, руководитель сектора госэталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин Федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева" (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева")

Чусов Игорь Александрович
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплофизики Обнинского института атомной энергетики –филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ»» (ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»)

Защита состоится «16» ноября 2017г. в 15:50, ауд.331 на заседании диссертационного совета Д212.227.02 по адресу: г.Санкт-Петербург, Кронверкский проспект 49 (адрес для почтовых отправлений – Кронверкский проспект 49, г. Санкт-Петербург, 197101).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» и на сайте www.ifmo.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.227.02

А.В.Федоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Повышение эффективности производства, качества и надежности выпускаемой продукции – одно из основных направлений развития Госкорпорации «Росатом», предусмотренного федеральными целевыми программами (ФЦП): «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годы и на перспективу до 2020 года», «Развитие космических средств специального назначения и других космических средств с ядерными энергетическими установками на борту на 2010 – 2020 гг.».

Разработки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) и тепловыделяющих сборок (ТВС) активных зон ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с увеличенным рабочим ресурсом, улучшенными техническими характеристиками ужесточают требования к качеству ведения технологических процессов производства, среди которых особое место занимают высокотемпературное спекание топливных таблеток из оксида урана, прецизионная термообработка металлических оболочек ТВЭЛОВ, а также хвостовиков, заглушек, дистанционирующих решеток и т.п. Температура в рабочем пространстве печного агрегата и температура изделия определяют качество готовой продукции, эффективность работы печи: производительность, качество управления технологическим процессом, затраты энергоресурсов, стойкость и долговечность функционирования оборудования, его межремонтный интервал. Уровень температуры и скорость ее изменения в переходных режимах, длительность выдержки и однородность температурного поля серьезно влияют на микроструктуру материала, а значит и его механические свойства, устойчивость к радиационным повреждениям. Микроструктура материала напрямую зависит от предыстории процесса, параметра «время-температура». Кроме того, термообработка реализуется в дорогостоящем специализированном термическом оборудовании, проверка технического состояния которого является неотъемлемой частью производственного процесса.

Однако, штатные процедуры проверки технологических режимов термического оборудования чрезвычайно трудоемки и длительны, что ухудшает такие показатели, как выход годного продукта, производительность, энергозатраты и т.д.

Совершенствование технологических процессов нагрева в современном термическом оборудовании атомной промышленности и металлургии требует разработки методов и средств оперативной проверки соответствия реальных процессов заданным технологическим регламентам. С их помощью необходимо уточнить тепловые характеристики термического оборудования и предложить новые конструктивные решения и процедуры контроля, функционирующего в режиме реального времени. Данный подход актуален как для уже действующих технологических линий, так и для перспективных технологий, разрабатываемых в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, техники и технологии, указанными в Указе Президента №899 от 07.07.2011.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является создание методики и средств исследования высокотемпературных режимов, повышение достоверности и эффективности управления сложными процессами термообработки и нагрева в теплотехническом оборудовании, используемом в производстве широкой номенклатуры изделий ядерной техники и металлургического проката.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА:

- созданы методика и процедуры мониторинга температурных режимов в штатном режиме работы печного оборудования при нагреве и термообработке изделий ядерной техники и металлургии. Разработаны оригинальные автономные программно-аппаратные регистрирующие комплексы, реализующие «on-line» диагностику и отладку технологического процесса печных агрегатов в вакууме и газовой среде с рабочей температурой до 1300 °С;

- обеспечены требуемые метрологические показатели программно-аппаратных комплексов за счет совершенствования конструкции и уменьшения до $\pm(0,2-0,3)$ % погрешности датчиков температуры с термопарами на основе никелевых и вольфрамениевых сплавов, в т.ч. путем совершенствования состава термоэлектродных материалов;

- разработана оригинальная конструкция термозонда с использованием вольфрамениевых термопар для измерения температуры расплава стали в литейном производстве изделий атомного машиностроения;

- с использованием разработанных средств мониторинга впервые выявлены особенности режимов термообработки тонкостенных труб в вакууме, режимов нагрева заготовок толщиной 250 и 300 мм в различных печных агрегатах, предложены приемы повышения эффективности и однородности режимов нагрева и термообработки.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ:

- реализованы системы мониторинга температурных полей в различных печных агрегатах в штатном режиме их работы (5-10) ч при температуре (1000-1300) °С. Проверка соответствия процесса технологическим требованиям может быть проведена при полной загрузке печи, когда теплоемкость максимальна. Уменьшение пределов погрешности измерительного канала до ± 2 °С при температуре 1000 °С в вакууме и до ± 4 °С при температуре 1300 °С в атмосфере продуктов сгорания позволяет использовать систему для проверки показаний штатных датчиков температуры печного агрегата и корректировки режимов ПИД-регулирования непосредственно в технологическом цикле термообработки изделий;

- апробированы расчетно-экспериментальные методы оценки эффективности тепловой защиты электронных систем. По результатам расчетов специально для вакуумных печей ALD и IPSEN спроектирован и изготовлен теплозащитный

контейнер, который активно применяется более 4 лет на предельных температурах эксплуатации печи (до 1200 °С);

- созданы усовершенствованные конструкции термопреобразователей. Разработана и аттестована методика калибровки вольфрамрениевых термопар, апробированная при проведении межлабораторных сличений в РФ и за рубежом;

- впервые в отечественной практике внедрены в технологические процессы нагрева системы «on-line» мониторинга технологического режима термообработки, уточнены характеристики температурных полей вакуумных и проходных печей, используемых для нагрева и термообработки изделий ядерной техники и металлургии. Рекомендованы методы и средства по совершенствованию конструкции печных агрегатов и температурных режимов их функционирования.

- в литейном машиностроительном производстве применены недорогие автономные термозонды для многократных кратковременных измерений температуры расплава стали перед его разливкой в формы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Разработанные программно-аппаратные регистрирующие комплексы, позволяющие запоминать и дистанционно передавать измерительную информацию, характеризующую состояние полей температуры в нагреваемом изделии и рабочем пространстве печного агрегата, а также вести отладку технологического режима при мониторинге печи.

2. Методика и результаты исследований температурных полей в вакуумных агрегатах производства элементов активной зоны ядерных реакторов, результаты исследований режимов нагрева стальных заготовок в высокопроизводительных проходных нагревательных печах прокатного производства.

3. Способ повышения точности и стабильности термопар на основе вольфрамрениевых сплавов.

4. Конструкция термозонда с использованием вольфрамрениевой термопары для измерения температуры расплава стали.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработаны варианты программно-аппаратных регистрирующих комплексов, которые изготовлены в ООО «ОТК» (г. Обнинск) с участием фирмы PhoenixTM (Великобритания) и внедрены на предприятиях Росатома (ПАО «МСЗ», Электросталь, АО «ЧМЗ», Глазов) и черной металлургии (ПАО «НЛМК», Липецк, ОАО «ММК», Магнитогорск, АО «ВМЗ», Выкса, ОАО «Уральская сталь», Новотроицк, АО «ПНТЗ», Первоуральск).

В ПАО «МСЗ» внедрена «Система диагностики температурных полей термического оборудования», переработана технологическая документация, что позволило аттестовать имеющееся вакуумное печное оборудование и существенно сократить затраты предприятия на проведение его периодических обследований.

Изготовление, калибровка и поставка многозонных измерительных комплектов нихросил-нисиловых и хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей для разработанных комплексов обеспечиваются ООО «ОТК».

Разработанная программа сбора и обработки данных измерений комплекса и штатных средств контроля печного агрегата зарегистрирована в Государственном реестре программ для ЭВМ и применяется в штатных режимах термообработки ПАО «МСЗ». Использование программы совместно с регистрирующим комплексом позволяет вести отладку технологического процесса в “on-line” режиме, в 4-5 раз сокращая время аттестации печи.

Повышение эффективности тепловых режимов нагревательных печей на ОАО «ММК», АО «ВМЗ» и ПАО «НЛМК» позволило снизить расход топлива от 4 до 12% и обеспечить улучшение однородности нагрева металла.

Разработаны технические условия на термопреобразователи ТП-К, ТП-Н, ТП-А, которые включены в Государственный реестр средств измерений (Госреестр СИ), серийно производятся ООО «ОТК» и поставляются на предприятия атомной промышленности, металлургии и машиностроения.

Термоэлектрическая характеристика термопары ВР5/ВР20 (тип А) введена в последнюю редакцию международного стандарта МЭК 60584-1 и 2, в т.ч. по результатам международных сличений.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные положения работы и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на:

- 4-й, 6-й, 7-й и 8-й международных научно-практических конференциях по печным агрегатам и энергосберегающим технологиям в металлургии и машиностроении, ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», Москва, 2008, 2012, 2014, 2016;
- международных симпозиумах “Temperature-2002” (Chicago, USA), “ТЕМРМЕКО-2010” (Portorozh, Slovenia), “Temperature-2012” (Los-Angeles, USA), «ТЕМРМЕКО-2013» (Madeira, Portugal);
- всероссийских и международных конференциях «Температура-2001» (Подольск), «Температура-2007» (Обнинск), «Температура-2011» (Санкт-Петербург);
- 6-й научно-практической конференции «Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии», Сочи, 2014;
- 5-й Всероссийской и стран КООМЕТ конференции по проблемам термометрии «Температура-2015», Санкт-Петербург, 2015.

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 47 научных работ, в т.ч. 5 статей в зарубежных научных изданиях, 4 из которых в базе данных SCOPUS, 8 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 4 патента РФ, 20 докладов в материалах и трудах международных и межотраслевых научно-практических конференций и совещаний, зарегистрировано 1 программное обеспечение.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа включает 239 страниц машинописного текста, 12 таблиц, 81 иллюстрацию. Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы 100 наименований и 6-и приложений на 91 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели, научная и практическая значимость исследования.

В первой главе проведен анализ особенностей производства в атомной промышленности и металлургии, характеризующегося постоянно растущими требованиями к качеству и надежности продукции. Практически на каждом этапе производства к рабочим операциям, оказывающим решающее влияние на качество продукции, относятся, в первую очередь, процессы нагрева и термической обработки в разнообразных печных агрегатах. При этом зачастую отсутствует объективный контроль температурных режимов работы печей и изменения реальной температуры изделия в печи, что критически важно для получения качественного конечного продукта.

Разработана схема, показывающая место процессов нагрева и термообработки в структуре технологических циклов производства компонентов ЯЭУ, когда принципиально важен контроль температуры процесса:

- плавка и разливка расплавленного металла в заготовки, литейные формы;
- нагрев заготовок в нагревательных печах для последующей прокатки, ковки, штамповки;
- термообработка изделий в вакууме, защитной атмосфере, химико-термическая обработка на машиностроительных заводах;
- спекание таблеток ядерного топлива.

На всех этапах производства важно контролировать температуру технологических процессов и быть уверенным, что ее распределение в рабочем объеме технологического оборудования соответствует установленным требованиям. Это важно как для процессов производства твэлов и ТВС, изготовления таблеток ядерного топлива, так и для начальных этапов производства: от плавки металла до изготовления металлопроката.

Описаны особенности технологических процессов нагрева и конструкции печных агрегатов, используемых в атомном машиностроении (вакуумные печи и печи с защитной атмосферой) и на предприятиях черной металлургии (проходные нагревательные печи). Проведен анализ современных технологических требований по качеству и точности нагрева и термической обработки в производстве компонентов ЯЭУ и возможностей реального диагностического оборудования, показавший, что для повышения технико-экономической эффективности промышленного производства изделий ядерной техники, необходимы:

- разработка нового измерительного и диагностического оборудования, позволяющего вести непрерывный контроль состояния печи при ее исследовании,

в т.ч. в режиме реального времени, а также сокращающего время простоя оборудования (увеличение производительности печи);

- повышение точности измерений температуры в процессе исследования печного агрегата;

- разработка специальных методик проведения исследования теплового состояния для каждой технологической установки;

- автоматизация процесса исследования, разработка специального программного обеспечения;

- внедрение разработок в промышленное производство для корректировки технологических режимов производства изделий ядерной техники.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и испытаны в цеховых условиях крупнотоннажного производства оригинальные программно-аппаратные регистрирующие комплексы для усовершенствованных систем мониторинга температурного поля в печных агрегатах производства изделий ядерной техники. Система мониторинга загружается непосредственно в рабочее пространство агрегата на все время проведения технологического процесса (до 10 ч при температуре до 1300 °С), и позволяет вести отладку процесса в реальном времени.

2. Достигнуты требуемые метрологические характеристики комплексов, включая проверку стабильности и сохраняемости характеристик датчиков температуры (термоэлектрических преобразователей) в заданный промежуток времени. Погрешность измерительного канала комплекса не превышает ± 2 °С при температуре 1000 °С в вакуумной печи и ± 4 °С при температуре 1300 °С в атмосферной печи. Усовершенствованы конструкции термопреобразователей температуры.

3. Предложен и подтвержден способ повышения точности и стабильности вольфрамениевых термопар путем легирования положительного электрода наночастицами оксида иттрия (0,05%). Разработана, изготовлена и запатентована конструкция термозонда с использованием вольфрамениевой термопары для измерения температуры жидкого металла в процессах литья специальных сталей при изготовлении деталей ТВС.

4. Разработана и внедрена в производство методика диагностики полей температуры вакуумных печных агрегатов, включая специальное программное обеспечение для обследования вакуумного печного оборудования в реальном времени. Выполнены обследования вакуумных печных агрегатов трех типов.

5. Впервые в металлургической практике выполнен мониторинг полей температуры на печных агрегатах прокатного производства с уточнением кривых нагрева заготовок в печах и выдачей рекомендаций по совершенствованию процессов нагрева:

- тонкостенных труб для оболочек ТВЭЛов длиной до 3,0 м и элементов ТВС из нержавеющей стали и сплавов циркония;
- трубных заготовок с контролем температуры стенки трубы в нескольких точках по длине;
- непрерывно литого сляба в туннельной печи при сверхмалой высоте между поверхностью сляба и футеровкой печи;
- стальных колесных заготовок последовательно в двух кольцевых печах;
- стальных слябов толщиной 300 мм станов горячей прокатки 5000, обеспечивающих производство газопроводных труб большого диаметра (1420 мм).

6. По результатам исследований:

- внедрена в производство процедура периодической аттестации вакуумных печных агрегатов ПАО «МСЗ» и в 4-5 раз сокращено время простоя вакуумных агрегатов ПАО «МСЗ» для проведения плановых проверок теплового состояния;
- выданы рекомендации по корректировке режимов нагрева в печных агрегатах металлургического производства, позволившие сэкономить до (4-12) % потребления энергоресурсов и снизить неравномерность нагрева заготовок до полутора раз;
- разработана система выходного контроля в производстве вольфрамениевых термопар и методика аттестации их в атмосферной печи в температурном диапазоне (600-1700) °С, что способствовало организации серийного выпуска специальных термоэлектрических преобразователей для предприятий Росатома.

СПИСОК основных работ, опубликованных по теме диссертации:

Публикации в журналах из перечня ВАК и иностранных изданиях:

1.
2.
3. Улановский А.А. Термоэлектрические преобразователи для измерения высоких температур // Металлургия машиностроения. 2004. №1. С.5-11.
4. Улановский А.А., Куракин А.В., Фрольцов М.С., Шкарупа И.Л. Вольфрамениевые термозонды в литейном и металлургическом производствах // Литейщик России. 2006. №1. С.28-31.
5. Улановский А.А., Шмырев Б.Л., Алтухов Ю.Н. Универсальные вольфрамениевые термопреобразователи в высокотемпературной термометрии // Приборы. 2006. №5. С.4-13.
6. Улановский А.А., Тааке М. Контроль высокотемпературной термической обработки стального проката // Сталь. 2008. №11. С.114-118.

7. Улановский А.А., Тимофеев Л.И. Современные системы диагностики для повышения тепловой эффективности печей для термообработки литых изделий // Литейщик России. 2010. №5. С.23-25.

8. Ulanovskiy A.A., Medvedev V.A., Nenashev S.N., Sild Yu.A., Matveyev M.S., Pokhodun A.I., Oleynikov P.P. Thermoelectric Characteristic of High-Temperature Thermocouples W5%Re/W20%Re // Int. Journal of Thermophysics. 2010. V.31 (8-9), pp. 1573-1582.

9. Ulanovskiy A.A., Zemba E.S., Belenkiy A.M., Chibizova S.I., Bursin A.N. Stability Of Cable Thermocouples At Upper Limit Of Working Range Of Temperatures // 9-th Int. Temperature symposium, Los-Angeles, USA, 2012. Published in AIP conf. proceedings, Melville, New York: American institute of physics, 2013. V.1552, p.576.

10. Oleynikov P.P., Zaytsev P.A., Turchin V.N., Ulanovskiy A.A., Nenashev S.N. Thermoelectric Properties Of W-Re Composite Strengthened By Nanoparticles Of Yttrium Oxide / 9-th Int. Temperature symposium, Los-Angeles, USA, 2012.–Published in AIP conf. proceedings, Melville New York: American institute of physics, 2013. V.1552, pp. 591-594.

11. Ulanovskiy A., Edler F., Fischer J., Oleynikov P., Zaytsev P., Pokhodun A. Features of High-Temperature Calibration of W-Re Thermocouples // Int. Journal of Thermophysics. 2015. V.36 (2-3), pp. 433-443.

12. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки // Черная металлургия: бюллетень науч.-техн. и экон. информ. 2015. №2. С. 62-69.

13. Негреев А.Н., Чеботов В.М., Кадошников А.А., Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей стана 5000 ПТЛ ОАО ММК // Черная металлургия: бюллетень науч.-техн. и экон. информ. 2016. №12. С.82-86.

Статьи и доклады:

14. Улановский А.А., Цукров С.Л., Ляпин А.В. Системы контроля температуры при термообработке алюминиевого проката / Сб. трудов 4-й Межд. научно-практ. конференции «Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении». М.: изд. «Учеба», МИСИС, 2008. С.18-19.

15. Улановский А.А., Беленький А.М. Повышение эффективности нагревательных печей станов горячей прокатки / Сб. трудов 6-й Межд. научно-практ. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология».-М.: Изд-во ООО «ИТЕП», НИТУ МИСИС, 2012.- С.471-483.

16. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Направления повышения энергоэффективности нагревательных печей станов горячей прокатки / Сб. трудов 7-й Межд. научно-практ. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология».-М.: Изд-во ООО «ИТЕП», НИТУ МИСИС, 2014.- С.64-68.

17. Улановский А.А. Метрологические аспекты производства высокотемпературных термоэлектрических преобразователей с ВР-термопарами /

6-я научно-практ. конф. «Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии». Тезисы докладов. Сочи, 2014. -С.120-123.

18. Лебедев И.А., Улановский А.А. Автоматизация процесса мониторинга температурных полей термического оборудования. Тез. докл. 5-й Всероссийской и стран-участниц КООМЕТ конф. по проблемам термометрии «Температура-2015», ФГУП ВНИИМ, С-Петербург, 2015. - С.225-228.