

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Голлай¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

Л.Ю. Костылева¹, kostylevali@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2451-3042>

К.А. Коренная², kkris221@mail.ru

О.В. Логиновский¹, loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Кузнецкие ферросплавы», Новокузнецк, Россия

Аннотация. Повышение эффективности деятельности промышленных предприятий во многом зависит от технологий, используемых в производстве и практическом применении выпускаемых предприятиями изделий и конструкций. Анализ выполненных авторами исследований в области методов контроля качества выпускаемой продукции и технологического оборудования из биметаллических листовых материалов показал, что в рамках сложившегося технологического уклада одним из средств удешевления производства является использование методов неразрушающего контроля. Показано, что одним из наиболее продуктивных среди методов неразрушающего контроля является тепловой метод. **Цель исследования:** обоснование выбора метода теплового контроля как средства совершенствования технологий контроля качества выпускаемой продукции и оборудования из биметаллических листовых материалов, а также повышения эффективности управления промышленными предприятиями соответствующего профиля. **Материалы и методы:** анализ исследований в области технологий и методов теплового контроля для предприятий. **Результаты.** Показана целесообразность и экономическая эффективность использования метода теплового контроля на предприятиях, выпускающих продукцию и использующих технологическое оборудование на основе биметаллических листовых материалов. Сформулированы требования и сформирована структура системы контроля качества указанных материалов на основе применения метода теплового контроля. Предложена математическая модель теплового состояния биметаллической пластины, а также возможности ее программной реализации. **Заключение.** Метод теплового неразрушающего контроля в современных условиях способен быть эффективным и продуктивным, позволяющим сделать приемлемыми в современных условиях ведения бизнеса расходы на внедрение в производство и эксплуатацию систем контроля качества. Полученные результаты могут быть использованы на промышленных предприятиях, деятельность которых в той или иной степени связана с использованием изделий и конструкций из многослойных биметаллических материалов.

Ключевые слова: биметаллы, тепловой неразрушающий контроль, дефектоскопия, управление промышленным предприятием, контроль качества

Для цитирования: Повышение эффективности деятельности промышленных предприятий, связанных с производством и использованием биметаллических листовых материалов / А.В. Голлай, Л.Ю. Костылева, К.А. Коренная, О.В. Логиновский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 4. С. 76–88. DOI: 10.14529/ctcr230408

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230408

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES INVOLVED IN THE PRODUCTION AND USE OF BIMETALLIC SHEET MATERIALS

A.V. Hollay¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

L.Yu. Kostyleva¹, kostylevali@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2451-3042>

K.A. Korennaya², kkris221@mail.ru

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² JSC "Kuznetsk Ferroalloys", Novokuznetsk, Russia

Abstract. Improving the efficiency of industrial enterprises is heavily reliant on the technologies employed in production and the practical application of the products and structures produced by the companies. The authors' research on quality control methods for manufacturing bimetallic sheet materials and technological equipment has revealed that non-destructive testing methods can significantly reduce production costs. The study identifies thermal testing as one of the most effective forms of non-destructive testing. **Aim.** The research aims to explore these testing methods and their cost-saving benefits within current technological procedures. Justifying the use of thermal non-destructive testing as a method for improving the quality control of bimetallic sheet materials during the manufacturing process and enhancing the efficiency of management in industrial enterprises of the relevant profile. **Materials and methods.** Analysis of researches in the field of technologies and methods of thermal non-destructive testing for enterprises. **Results.** The benefits and cost-effectiveness of using thermal non-destructive testing methods in manufacturing companies that produce products and use technological equipment with bimetallic sheet materials are demonstrated. Requirements are outlined and a quality control system structure for these materials is established based on the thermal non-destructive testing method. A mathematical model for determining the thermal state of a bimetallic plate is presented alongside the potential for its software implementation. **Conclusion.** The method of thermal nondestructive testing proves to be efficient and productive in modern conditions, enabling acceptable cost implementation of quality control systems in production and operation. The findings can be applied in industrial companies that work with multilayer bimetallic materials in their products and constructions.

Keywords: bimetal, thermal non-destructive testing, flaw detection, industrial enterprise management, quality control

For citation: Hollay A.V., Kostyleva L.Yu., Korennaya K.A., Loginovskiy O.V. Improving the efficiency of industrial enterprises involved in the production and use of bimetallic sheet materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(4):76–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230408

Введение

На многих современных предприятиях, а также в сфере эксплуатации разнообразных изделий широко используются многослойные биметаллические материалы. Это дает возможность существенно снизить расходы на производство и эксплуатацию произведенных на их основе конструкций, изделий, бытовой продукции. Подобная экономия достигается за счет уменьшения использования дорогостоящих материалов со специальными свойствами, повышенной коррозионной стойкости конструкций, снижения веса, повышения прочностных характеристик и эксплуатационных свойств изделий [1].

В то же время важно понимать, что дефекты внутри биметаллического материала, нарушение целостности отдельных слоёв представляют собой довольно большую опасность, так как могут привести к увеличению затрат на производство и расходов на эксплуатацию разнообразных конструкций и изделий. Поэтому для повышения надежности и долговечности работы машин и других изделий, изготавливаемых из биметаллов, необходимо проводить непрерывный контроль их качества.

Как известно, в целом ряде технологических процессов многих промышленных предприятий широко используются методы повышения качества выпускаемой продукции за счет современных

средств мониторинга параметров изделий. На сегодняшний день подобный мониторинг осуществляется либо с помощью уже довольно устаревших методов разрушающего контроля (когда о качестве партии изделий судят по результатам проверки отдельных ее образцов), либо с применением более современных методов неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиационный, вихретоковый, тепловой, магнитный и др.). Анализ практического использования перечисленных методов показал, что вихретоковый и ультразвуковой методы являются контактными и требуют применения дорогостоящего оборудования, которое может эксплуатироваться лишь аттестованными, высококвалифицированными специалистами; радиационный метод хотя и обеспечивает бесконтактный контроль, тем не менее не слишком хорош в использовании, так как связан с опасным излучением, которое наносит вред операторам; одним из наименее затратных и наиболее перспективных является тепловой метод, который осуществляется бесконтактным способом и позволяет получить изображение большого участка поверхности или изделия в целом [2]. Кроме того, данным методом можно проводить проверку всей партии изделий, в том числе непосредственно в ходе технологического процесса. Устройства для проведения теплового контроля более компактны, существенно ниже по стоимости, чем оборудование для других методов, а также позволяют передавать изображение контролируемых изделий непосредственно на компьютер, в том числе по беспроводной связи [3, 4].

Следует отметить, что применение методов ультразвукового контроля для тонколистовых биметаллических материалов менее эффективно, поскольку подобные материалы имеют неоднородную структуру, их слои отличаются по химическому составу, механическим и физическим свойствам, что влияет на стабильность акустических свойств и приводит к погрешностям измерения координат дефектов [5].

Можно констатировать, что методы теплового контроля по сравнению со всеми иными упомянутыми методами являются наиболее выигрышными как в плане производительности, мобильности, безопасности, возможности автоматизации и т. п., так и в плане минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а соответственно, и сроков окупаемости.

Важно понимать, что методы теплового контроля можно применять не только на металлургических предприятиях, выпускающих продукцию из листовых многослойных биметаллических материалов, но и на производствах различного профиля, где используется оборудование и изделия из этих материалов (химических, машиностроительных, судостроительных, нефтеперерабатывающих и пр.).

1. Совершенствование технологий контроля качества выпускаемой продукции и оборудования из биметаллических листовых материалов как средство повышения эффективности управления промышленными предприятиями соответствующего профиля

Повышение производительности труда на промышленных предприятиях нашей страны, как, впрочем, и в зарубежных странах, на протяжении уже многих десятилетий является в сущности одной из основных задач развития экономики. Установление неких процентных показателей, которые должны характеризовать подобный рост производительности, в прошлые годы было гораздо более простой задачей, чем сегодня, поскольку совершенствование технологий производств давало возможность добиваться более существенных результатов, чем в настоящее время, когда производственные возможности уже практически достигли предела в рамках современных технологических укладов [6, 7].

В данном контексте полезно вспомнить идеи, высказанные Н.Д. Кондратьевым еще в начале прошлого века, связанные с длинными циклами экономической конъюнктуры [8].

Излагая концепцию длинных циклов экономической конъюнктуры, Н.Д. Кондратьев указывал, что динамика конъюнктуры промышленного рынка не линейна, а циклична. Причины этого «лежат в цикличности действия накапливающегося основного общественного капитала и его размещения и, соответственно, в цикличности развития и перераспределения производительных сил». Н.Д. Кондратьев обосновал и на анализе исторического опыта доказал, что наблюдаются и понижительные волны больших циклов: «Большие циклы конъюнктур, на фоне которых протекают малые циклы, обуславливаются процессами радикального перераспределения накопленных и накапливающихся капиталов, выражающимися внешне в глубоких реформах индустрии и революции техники, в привлечении новых территорий, в подготовке новых кадров квалифицирован-

ного труда». Он отмечал также, что большие циклы конъюнктуры увязаны с «подготовкой новых кадров квалифицированного труда», а также с «широким распространением поколений техники нового технологического уклада», лежащего в основе циклической динамики.

При этом «радикальные изменения в условиях и организации производства требуют нового уровня квалификации труда и приводят к перевороту, революции в образовании».

Большие циклы экономической конъюнктуры, по мнению Н.Д. Кондратьева, по-разному отражаются на динамике различных показателей и синхронизируются в ведущих странах: «установленные выше большие циклы важнейших элементов экономической жизни имеют международный характер».

Анализ объективных основ больших циклов конъюнктуры позволил Н.Д. Кондратьеву сделать вывод о том, что «в процессе воспроизводства, в периодическом обновлении основных фондов в результате технологических переворотов, в освоении значительных технических изобретений и открытий направления и интенсивность научно-технических открытий и изобретений являются функцией запросов практической действительности и предшествующего развития науки и техники. Однако для их широкого практического использования нужны экономические условия: научно-технические изобретения могут быть, но могут оставаться недейственными, пока не появятся необходимые экономические условия для их реализации... Само развитие техники включено в закономерный процесс экономической динамики» [9].

Таким образом, материальную основу волн больших или длинных циклов Н.Д. Кондратьев видел в массовом обновлении основного капитала или последовательной смене технологических укладов.

Таким образом, одним из важнейших выводов, следующих из анализа больших циклов, является то, что экономическая востребованность или, если быть более точными, общественная необходимость в смене сложившегося экономического уклада лежит в основе всей цивилизационной динамики [10]. Разумеется, что возникновение такого уклада не состоится без достижения техническим базисом цивилизации уровня, на котором научные открытия, изобретения, а также технологии их воплощения смогут быть использованы человечеством для очередного прорыва в будущее [11].

На основе указанных теоретических построений становится достаточно ясным, что увеличение роста производительности может быть достигнуто в том числе за счет развития новых технологий контроля качества продукции.

Развитие электроники и робототехники, компьютерных технологий и систем в конце XX – начале XXI в., появление тепловизионных устройств нового поколения (неохлаждаемых портативных тепловизоров) и мощных импульсных нагревателей способствовали росту интереса к использованию теплового неразрушающего контроля для проведения различных исследований [4]. Современные компьютерные системы позволяют в реальном времени обрабатывать изображения термограмм, применять для анализа теплового состояния многослойных материалов сложные математические модели и методы их реализации.

Тепловой контроль в последние годы с успехом применяется при обследовании строительных конструкций, обнаружении потерь тепла в зданиях и сооружениях. В то же время анализ существующих национальных стандартов в области использования данного метода неразрушающего контроля показывает, что в других отраслях внедрение в практику термографических технологий контроля и диагностики объектов находится на начальном этапе [3]. При этом результаты многочисленных исследований российских и зарубежных авторов, подробный анализ которых представлен в [4, 12], дают понять, что методы теплового неразрушающего контроля позволяют выявлять самые разные виды скрытых дефектов (расслоения, трещины, пустоты, посторонние включения, примеси и пр.), что способствует раннему обнаружению и устранению брака выпускаемой продукции, а также своевременному планированию ремонта или замены технологического оборудования.

Таким образом, применение методов теплового неразрушающего контроля для биметаллических листовых материалов является эффективным и целесообразным при совершенствовании технологий контроля качества выпускаемой продукции металлургических производств и технологического оборудования крупных предприятий.

2. Построение системы контроля качества выпускаемой продукции и оборудования из биметаллических листовых материалов с использованием методов теплового неразрушающего контроля

Необходимо пояснить, что тепловой контроль, представляющий собой метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых (температурных) полей объектов, среди прочих является одним из наиболее эффективных в практическом использовании методов.

При его использовании изменения температуры на поверхности объекта регистрируют различными средствами измерения, чаще всего инфракрасной камерой (тепловизором). Если объект имеет однородную температуру, равную или близкую к температуре окружающей среды, его предварительно нагревают (или охлаждают) с использованием дополнительного источника тепловой стимуляции (такой способ называют активным тепловым контролем). Скрытые дефекты вызывают появление температурных аномалий на поверхности в виде локального перегрева или понижения температуры [2, 4]. Полученные данные фиксируют в виде набора значений температуры в различных точках поверхности или изображения, отображающего распределение интенсивности инфракрасного излучения (термограммы), а затем проводят их анализ при помощи разнообразных алгоритмов и методов с целью определения наличия, типа и размеров дефекта.

Учитывая вышеизложенное, формируемая система контроля качества многослойных биметаллических листовых материалов, базирующаяся на использовании методов теплового неразрушающего контроля, должна выполнять следующие функции:

- 1) обеспечивать заданный режим нагрева (или охлаждения) объекта контроля до определенной температуры, позволяющий достичь пригодного для регистрации температурного сигнала;
- 2) измерять и регистрировать температурное поле объекта (температуру и координаты точек поверхности объекта контроля);
- 3) по характеристикам температурного поля (величине и форме температурных сигналов, их изменению во времени) определять наличие дефекта и оценивать его параметры.

Для нагрева (охлаждения) объекта контроля применяют различные источники теплового нагружения. Для металлических материалов наиболее часто используют оптический нагрев лампами различной мощности или лазером, индукционный нагрев вихревыми токами, пропусканием электрического тока через объект, а также конвекционный нагрев потоками жидкости или газов (рис. 1).



Рис. 1. Способы проведения активного теплового контроля
Fig. 1. Methods of active thermal non-destructive testing

Для проведения измерений нужно подобрать устройство, позволяющее одновременно регистрировать температурное распределение на всей поверхности биметаллического листа. Это может быть выполнено при помощи тепловизора.

Расположение источников нагрева и средств измерения относительно объекта контроля влияет на выявляемость дефектов. Наиболее точные результаты дает односторонняя процедура, при которой нагрев и измерение проводятся с одной стороны контролируемого объекта [2, 4]. Двухсторонняя процедура, при которой нагрев производится с одной стороны образца, а измерение температуры – с другой, также пригодна для контроля многослойных биметаллических пластин, поскольку они имеют относительно небольшую толщину и хорошую теплопроводность.

Полученные в ходе проведения контроля термограммы позволяют выявить участки объекта, различающиеся по температуре. Определить наличие дефекта под аномальным участком и оценить его параметры можно лишь при наличии адекватных алгоритмов и математических моделей, теоретически описывающих зависимость результатов контроля от свойств объекта и выбранных технологических режимов. При этом модель должна учитывать особенности контролируемого объекта (форму, геометрические и теплофизические характеристики, способ крепления слоев, возможное расположение и типы дефектов) и применяемого режима теплового контроля [12].

Для получения расчетных значений и обработки экспериментальных данных необходимо также выбрать методы и разработать алгоритмы решения задачи теплового состояния объекта контроля и на их основе создать специализированное программное обеспечение с применением известных математических пакетов или универсальных языков программирования высокого уровня.

Применение методов теплового неразрушающего контроля на предприятиях регламентируется различными документами по стандартизации и локальными нормативными документами предприятия.

Таким образом, для выполнения требуемых функций формируемая система контроля качества выпускаемой продукции и технологического оборудования должна иметь в составе технические и программные средства, алгоритмическое, методическое и нормативное обеспечение (рис. 2).



Рис. 2. Состав системы контроля качества, базирующейся на использовании методов теплового неразрушающего контроля
Fig. 2. Composition of the quality control system based on the use of thermal non-destructive testing methods

К техническим средствам относятся тепловизионные системы для регистрации характеристик теплового поля объекта, источник тепловой стимуляции и аппаратные средства компьютерной системы, отвечающей за сбор, обработку и хранение информации. Программные средства включают системное и прикладное, стандартное и специальное программное обеспечение.

Важную роль играет алгоритмический компонент системы, интегрирующий методику проведения контроля, математические модели теплового состояния объекта контроля и алгоритмы решения тепловых задач. Методические рекомендации по проведению процедур теплового контроля определяют эффективные условия применения конкретных способов и режимов контроля, выбора типа источника теплового нагружения, формы и размеров зон тепловой стимуляции и регистрации температуры, взаимного расположения устройств нагрева и измерения температуры.

Регламентация работ по контролю качества на конкретном предприятии находит отражение в нормативных документах организаций, учитывающих возможности предприятия по выбору тех или иных методов, параметров и режимов теплового неразрушающего контроля. Разумеется, что локальные нормативные акты разрабатываются с учетом действующих документов национальной системы стандартизации и не могут им противоречить.

При формировании структуры системы для активного ТК исследуемого объекта (рис. 3) необходимо обеспечить управление источником тепловой стимуляции для установления заданного режима нагрева (охлаждения), получение данных температурного поля через определенные промежутки времени, сбор и хранение данных в виде последовательности значений температур или изображений (термограмм), их передачу для обработки специализированными программными средствами.

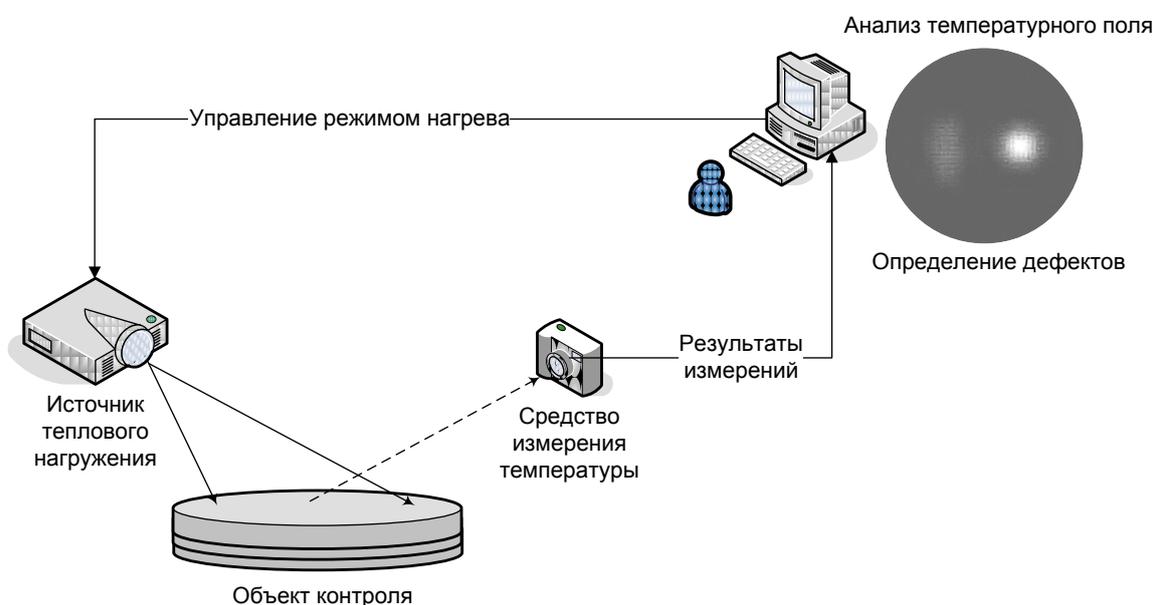


Рис. 3. Структура системы активного теплового контроля многослойных биметаллических материалов
Fig. 3. Structure of the active thermal non-destructive testing system for multilayer bimetallic materials

Накопление и обработка информации, полученной в ходе экспериментальных исследований, позволит сформировать зависимости, позволяющие по результатам обработки термограмм не только найти дефект, но и определить его тип, параметры, глубину залегания и пр. Для выработки производственных решений стоит обеспечить удобный для восприятия вывод данных, свидетельствующих о наличии дефектов и результатах оценки их параметров.

3. Развитие информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля

Логика того, как должна создаваться и развиваться информационная система промышленного предприятия, должна состоять в следующем.

Главная идея, на которой должна строиться автоматизированная информационная система управления корпорацией, состоит в том, что автоматизация деятельности всех подразделений компании должна быть максимально ориентирована на получение руководством организации качественной, непротиворечивой и своевременной информации для принятия управленческих

решений. При этом информационная система предприятия должна давать возможность его руководству осуществлять эффективное управление операционной деятельностью компании.

В этой связи основные приоритеты информационной системы предприятия должны быть связаны ни с чем иным, как с использованием новейших информационных технологий и моделей в тех бизнес-процессах, которые реализуют процедуры подготовки и принятия оперативных и стратегических решений руководством предприятия [13, 14]

В ходе исследования и проектирования процессов и систем активного теплового контроля разрабатываются сложные математические модели теплового состояния, для реализации которых применяют современные средства компьютерного моделирования. При выборе программных продуктов для моделирования теплового состояния многослойных биметаллических листовых материалов и изделий из них необходимо учитывать следующие основные требования:

1) возможность проведения расчетов по математической модели аналитическими или численными методами на основе линейных или дифференциальных уравнений с учетом теплофизических характеристик материалов и граничных условий различной степени сложности;

2) расчет двумерного и/или трехмерного температурного поля;

3) визуализация результатов температурного поля в виде графиков и/или модельных термограмм;

4) обработка и анализ температурного поля с натурной или модельной термограммы для целей дефектоскопии (решение обратной тепловой задачи).

Таким образом, современные системы оценки качества многослойных биметаллических листовых материалов методами теплового контроля помимо источника теплового нагружения и устройства регистрации и визуализации температурного поля включают также программные средства для моделирования теплового состояния и обработки экспериментальных данных.

Для целей моделирования процессов теплового контроля могут быть использованы существующие системы класса CAE (computer-aided engineering).

Для выполнения математических расчетов аналитическими и численными методами применяют проприетарные программные пакеты MATLAB, MathCAD, Maple, Mathematica и др. Среди свободно распространяемых пакетов с аналогичными функциями можно выделить GNU Octave (www.gnu.org/software/octave), который по своим возможностям является наиболее полным аналогом MATLAB. Также широко используется научный программный пакет для численных расчетов Scilab (www.scilab.org) с открытым исходным кодом, включающий сотни математических функций, сложные структуры данных (списки, рациональные функции, полиномы, линейные системы) с возможностью интерактивного добавления программ на разных языках (C, C++, Fortran). Среди альтернатив проприетарному ПО можно также отметить систему компьютерной алгебры Sage (www.sagemath.org), которая включает алгебру, комбинаторику, вычислительную математику и математический анализ. Из перечисленных свободно распространяемых пакетов наиболее высокую скорость вычислений и широкий ассортимент функций имеет GNU Octave [15].

Среди проприетарного ПО для моделирования методом конечных элементов доступным в текущих условиях остается программный пакет COMSOL (www.comsol.ru), позволяющий решать задачи электромагнитного, теплового, гидрогазодинамического и механического анализа, в том числе совмещенные (мультифизические). Бесплатные ограниченные версии программ предоставляют разработчики российского пакета конечно-элементного моделирования ELCUT (www.elcut.ru) его европейского аналога QuickField (www.quickfield.com) [16]. Облачная платформа моделирования SimScale (www.simscale.com) предоставляет доступ к инструментам моделирования через браузер без использования специального оборудования. Модуль теплопередачи позволяет вычислять распределение температуры и тепловой поток в твердых телах при тепловых нагрузках для стационарных и переходных процессов. Геометрическая модель загружается из CAD-системы, при этом SimScale поддерживает форматы широко распространенных САПР (Autodesk Inventor, CATIA, SolidWorks и др.).

Среди свободно распространяемых программных продуктов для расчетов методом конечных элементов наиболее широкими возможностями обладает Agros2D (www.agros2d.org), разработанный в Университете Западной Богемии (Чехия) [17].

Помимо пакетов CAE общего применения для моделирования процессов теплового контроля создается специализированное программное обеспечение. В частности, для анализа некоторых

задач моделирования теплового состояния многослойных пластин, разработаны программные модули Multilayer-3D, ThermoCalc-2D, ThermoCalc-6L Томского политехнического университета [4]. В программе ThermoCalc-2D реализовано численное решение задачи нагрева трехслойной пластины с дисковидным дефектом (двумерная модель в цилиндрических координатах), а в программе ThermoCalc-6L можно исследовать процесс нагрева трехслойного параллелепипеда с дефектами аналогичной формы (трехмерная модель в декартовых координатах) [12].

Отметим также разработанную и апробированную авторами модель теплового состояния трехслойной биметаллической пластины с дефектом в виде воздушной прослойки между металлами [18].

Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих условия проведения процедуры активного теплового неразрушающего контроля с возможностью задания геометрических размеров и теплофизических характеристик материалов слоев пластины, различных вариантов нагрева и охлаждения пластины, имитирующих все возможные способы взаимного расположения источника нагрева и устройства регистрации температуры.

Для решения задач моделирования авторами разработан алгоритм решения методом конечных разностей и его программная реализация в GNU Octave. Результатом работы программы является вычисление значений температуры в заданных точках многослойной пластины и построение графиков распределения температуры по радиусу для верхней и нижней поверхностей пластины после ее нагрева и дальнейшего охлаждения на воздухе (рис. 4).

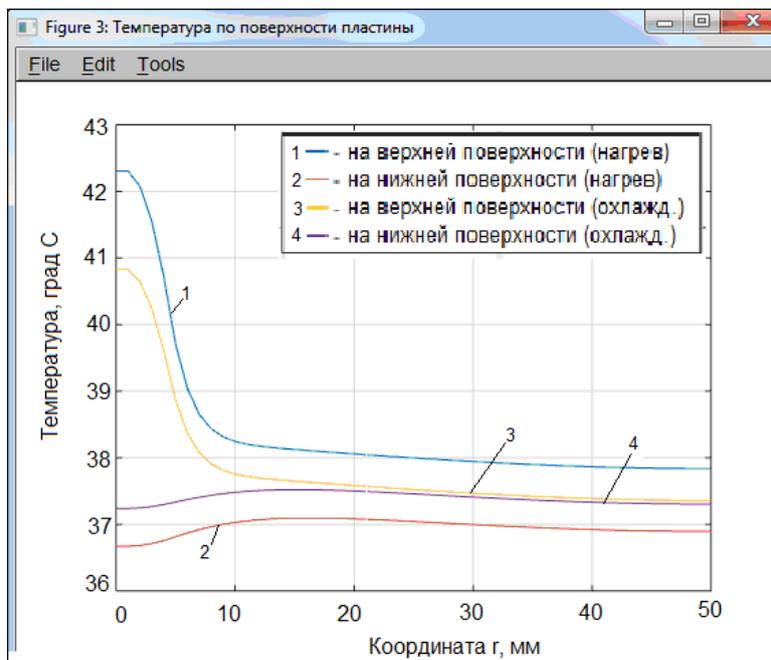


Рис. 4. Графическое представление результатов моделирования теплового состояния многослойной биметаллической пластины в GNU Octave
Fig. 4. Graphical representation of the results of modelling the thermal state of a multilayer bimetallic plate in GNU Octave

Разработанный программный модуль на интерпретируемом языке программирования MATLAB/Octave позволяет сформировать любые графики на основе полученных расчетных данных переходного теплового процесса.

Кроме того, в [18] представлено решение задачи моделирования теплового состояния указанной пластины методом конечных элементов в программном пакете Agros2D. Данный пакет также позволяет производить вычисление значений температуры в любой точке пластины и представлять результаты в виде диаграмм распределения температурного поля в сечении и различных графиков. Отличительной особенностью графического постпроцессора пакета Agros2B является возможность построения трехмерной модели объекта, которую можно поворачивать относительно начала координат и просматривать в различных режимах, в любой момент времени (рис. 5).

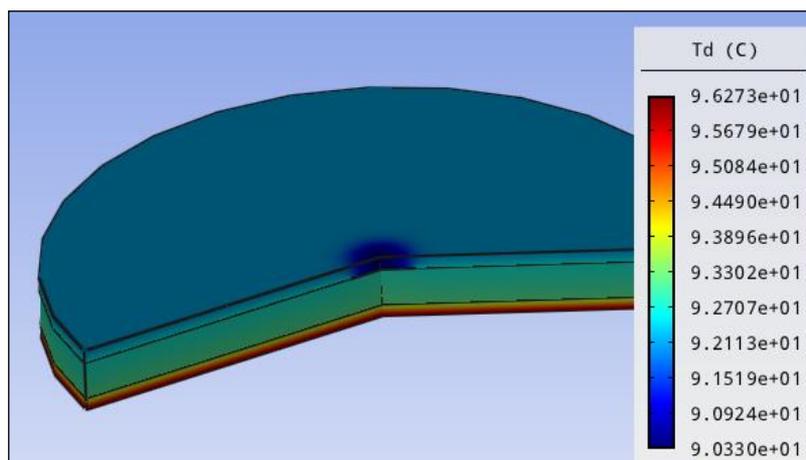


Рис. 5. Трехмерная визуализация распределения температуры в многослойной биметаллической пластине (программный пакет Agros2D)
Fig. 5. Three-dimensional visualisation of temperature distribution in a multilayer bimetallic plate (Agros2D software package)

Рассмотренные программные средства дают возможность в ходе моделирования оценить результирующие температурные поля для распознавания дефектов в реальных условиях контроля.

Совершенствование информационных систем для поддержки процессов оценки качества биметаллических листовых материалов с использованием тепловых методов неразрушающего контроля возможно за счет использования методов искусственного интеллекта для классификации дефектов по изображениям термограмм в реальном времени. Данный шаг станет доступным в результате накопления массивов данных, реальных и модельных термограмм для различных типов и видов дефектов и последующего обучения алгоритмов компьютерного зрения на основе наборов изображений и совокупности признаков наличия или отсутствия того или иного дефекта.

Таким образом, многие существующие программные продукты могут быть использованы для решения задач моделирования процессов теплового контроля в ходе оценки качества выпускаемой продукции и технологического оборудования из биметаллических листовых материалов. Интеграция существующих и вновь разрабатываемых программных модулей в составе информационных систем поддержки процессов оценки качества подобных изделий позволяет существенно сократить затраты на подготовку и обработку данных, многократно задействовать разработанные модели в различных экспериментах. Развитие указанных информационных систем основано на использовании алгоритмов методов конечных разностей и конечных элементов, с оптимальным построением сеточных моделей для анализа объектов со сложной геометрией, неровностями поверхности, малоразмерными дефектами, с возможностью ручного или автоматического изменения шага по времени, а также автоматизации расчетов за счет разработки дополнительных программных модулей на различных языках программирования и использования методов искусственного интеллекта.

Заключение

По результатам анализа исследований в области практического применения методов теплового неразрушающего контроля выявлены требования к системе контроля качества продукции и технологического оборудования из многослойных биметаллических листовых материалов. Система должна обеспечивать не только возможность проведения измерений в оптимальных условиях и представление результатов, но и их программную обработку на основе адекватных математических моделей объекта теплового контроля, методов и алгоритмов решения тепловых задач. С учетом данных требований определены состав и структура системы контроля качества, базирующейся на использовании методов теплового неразрушающего контроля. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что используемый метод в условиях современного технологического уклада способен быть эффективным и продуктивным, позволяющим сделать приемлемыми в современных условиях ведения бизнеса расходы на внедрение в производство и эксплуатацию систем контроля качества.

Список литературы

1. Материаловедение. Технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев, В.П. Шаронова. М.: КНОРУС, 2016. 270 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справ.: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с.
3. Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического применения: моногр. / З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев [и др.]. М.: МИСИС, 2008. 476 с.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: научное издание. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
5. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Машиностроение, 2019. 576 с.
6. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 456 с. DOI: 10.12737/1087996
7. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
8. Управление промышленным предприятием в условиях глобальной нестабильности: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов, А.Л. Шестаков. Челябинск.: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 403 с.
9. Кондратьев Н.Д., Яковец Ю.В., Абалкин Л.И. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения: избранные труды / М.: Экономика, 2002. 767 с.
10. Логиновский О.В. Динамика глобального мира. М.: Машиностроение, 2011. 1152 с.
11. Коренная К.А., Голлай А.В., Логиновский О.В. Модели управления промышленными предприятиями в условиях нестабильности внешней среды и необходимости технологического перевооружения // Проблемы управления. 2021. № 4. С. 40–49. DOI: 10.25728/ru.2021.4.4
12. Vavilov V., Burleigh D. Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8
13. Стратегическое и оперативное управление промышленными предприятиями: учеб. пособие / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко, А.Л. Шестаков. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. 325 с.
14. Методы и модели управления промышленными предприятиями и корпорациями / О.В. Логиновский [и др.]. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2022. 221 с.
15. Sharma N., Gobbert M.K. A comparative evaluation of Matlab, Octave, FreeMat, and Scilab for research and teaching [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266492293> (дата обращения: 05.02.2023).
16. Есьман Р.И., Шевцов В.Ф. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2006. № 5. С. 62–67.
17. Костылева Л.Ю. Моделирование процессов активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин при помощи современных программных средств // Научный поиск: Материалы четырнадцатой научной конференции аспирантов и докторантов. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2022. С. 148–157.
18. Костылева Л.Ю., Логиновский О.В. Моделирование процессов активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин // Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2022. С. 70–77.

References

1. Koblelev A.G., Sharonov M.A., Koblelev O.A., Sharonova V.P. *Materialovedenie. Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Materials Science. Technology of composite materials]. Moscow: KNORUS; 2016. 270 p. (In Russ.)
2. Klyuev V.V. (Ed.). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy: spravochnik* [Nondestructive testing instruments for materials and products. Handbook]. In 2 books. Book 1. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1986. 488 p. (In Russ.)

3. Salikhov Z.G., Budadin O.N., Ishmet'ev E.N. et al. *Inzhenernyye osnovy teplovogo kontrolya. Opyt prakticheskogo primeneniya: monografiya* [Thermal nondestructive testing engineering basics. Practical application experience. Monograph]. Moscow, MISIS; 2008. 476 p. (In Russ.)
4. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing]. Moscow: ID Spektr; 2009. 544 p. (In Russ.)
5. Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy* [Physical methods of non-destructive testing of welded joints]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2019. 576 p. (In Russ.)
6. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografiya* [The effective management of organizational and production structures. Monograph]. Moscow: Infra-M; 2020. 456 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
7. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Industrial Enterprise Management: Strategies, Mechanisms, Systems. Monograph]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
8. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennym predpriyatiem v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monografiya* [Management of an industrial enterprise in conditions of global instability. Monograph]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 403 p. (In Russ.)
9. Kondrat'ev N.D., Yakovets Yu.V., Abalkin L.I. *Bol'shie tsikly kon'yunktury i teoriya predvideniya: izbrannye trudy* [Large cycles of conjuncture and anticipation theory. Selected works]. Moscow: Ekonomika Publ.; 2002. 767 p. (In Russ.)
10. Loginovskiy O.V. *Dinamika global'nogo mira* [Dynamics of the global world]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2011. 1152 p. (In Russ.)
11. Korennaya K.A., Hollay A.V., Loginovskiy O.V. Models of managing industrial enterprises under an unstable environment and technological re-equipment. *Control Sciences*. 2021;(4):40–49. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2021.4.4
12. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 610 p. DOI: 10.1007/978-3-030-48002-8
13. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L. *Strategicheskoye i operativnoye upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami* [Strategic and operational management of industrial enterprises: textbook]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2021. 325 p. (In Russ.)
14. Loginovskiy O.V. et al. *Metody i modeli upravleniya promyshlennymi predpriyatiyami i korporatsiyami* [Methods and models of management of industrial enterprises and corporations]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2022. 221 p. (In Russ.)
15. Sharma N. Gobbert M.K. A comparative evaluation of Matlab, Octave, FreeMat, and Scilab for research and teaching. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/266492293> (accessed 05.02.2023).
16. Yesman R.I., Shevtsov V.F. Computer simulation of heating processes in multi-layer composite structures. *Izvestiâ vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edinenij SNG. Énergetika*. 2006;5:62–67. (In Russ.)
17. Kostyleva L.Yu. [Modelling of processes of active thermal non-destructive testing of multilayer bimetallic plates using modern software]. In: *Scientific Search: Proceedings of the fourteenth scientific conference of postgraduate students and doctoral students*. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2022. P. 148–157. (In Russ.)
18. Kostyleva L.Yu. Loginovskiy O.V. [Modelling of processes of active thermal non-destructive testing of multilayer bimetallic plates]. In: *Management of Large Systems: Proceedings of the XVIII All-Russian School-Conference of Young Scientists*. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2022. P. 70–77. (In Russ.)

Информация об авторах

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Костылева Лилия Юрьевна, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kostylevali@susu.ru.

Коренная Кристина Александровна, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Кузнецкие ферросплавы», Новокузнецк, Россия; kkris221@mail.ru.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Information about the authors

Alexander V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alexander@hollay.ru.

Liliya Yu. Kostyleva, Senior Lecturer of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kostylevali@susu.ru.

Kristina A. Korennaya, Cand. Sci. (Eng.), General Director, JSC “Kuznetsk Ferroalloys”, Novokuznetsk, Russia; kkris221@mail.ru.

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2023

The article was submitted 30.05.2023