

УДК 621.316.82

ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК ПАРАМЕТРОВ ВСТРОЕННОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ СИСТЕМ СБОРА ИНФОРМАЦИИ

А.Д. Абраменков

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Научный руководитель – к.т.н., доцент Ю.В. Троицкий

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Высокая точность измерения различных физических величин в широком диапазоне их изменения, возможность обеспечения первичной обработки полученных результатов с использованием минимального набора инструментальных средств обеспечили широкую популярность у разработчиков контрольно-измерительной аппаратуры однокристалльных прецизионных систем сбора и обработки информации («аналоговых микроконтроллеров»).

Параметры встроенного цифрового фильтра, влияя на уровень собственных шумов аналого-цифрового преобразования (АЦП), в значительной мере определяют и его эффективную разрешающую способность (ЕНОВ). Естественно, что выбор полосы пропускания фильтра определяется, прежде всего, спектральным составом исследуемого сигнала, который определяет полосу пропускания фильтра и частоту преобразования АЦП.

Реализация разрешающей способности, заданной разрядностью данных АЦП, возможна только при надежном подавлении, как собственного шума преобразователя, так и источников внешнего шума.

Методике расчета значения ЕНОВ посвящено значительное число работ, но они не используют в полной мере возможности встроенных цифровых фильтров.

Цель работы – предложить методику настройки характеристик встроенного цифрового SINC3-фильтра для обеспечения ЕНОВ АЦП.

Базовые положения исследования:

- проведено исследование методов настройки характеристик встроенного SINC3-фильтра с помощью программы DigitalFilterFrequencyResponse;
- рассмотрен расчет ЕНОВ с учетом влияния шумов первичного преобразователя сигналов $U_{NoiseConv}$ и шумов источника опорного напряжения $U_{NoiseRef}$.

Промежуточные результаты:

- в работе дана методика оптимизации параметров встроенного цифрового фильтра однокристалльных систем сбора информации с сигма дельта модуляцией, обеспечивающая необходимое подавление как собственных шумов АЦП, так и внешних источников шума;
- дана методика определения *ЕНОВ* с учетом влияния шумов первичного преобразователя.

Основной результат:

- в работе дан расчет параметров цифрового фильтра для АЦП сопротивления тензометрических датчиков.

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАМЕР ЖРД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Н.В. Астрединова

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров

Краткое вступление, постановка проблемы. В процессе создания серийного изготовления жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) широко применяются средства и методы неразрушающего контроля, обеспечивающие качество и надежность изготавливаемых двигателей. Однако неразрушающий контроль качества паяных соединений стенок камер ЖРД на всем протяжении изготовления ракетных двигателей и до настоящего времени отсутствовал. Контроль качества пайки подтверждается косвенными методами, в том числе прочностными и огневыми испытаниями (КИ, КВИ и КТИ), что не исключает материальных потерь. В связи с высокими требованиями к качеству паяных соединений и особенностями конструкции сопла, возникла необходимость разработки, отработки и внедрения в производство технологии неразрушающего контроля с помощью лазерно-ультразвуковой диагностики.

Цель работы. Разработка методики контроля качества паяных соединений камер ЖРД методом лазерно-ультразвуковой диагностики, позволяющая обеспечить качество соединений.

Базовые положения исследования. Метод лазерно-ультразвуковой диагностики основан на лазерном возбуждении широкополосных акустических сигналов в специальном оптико-акустическом преобразователе. С помощью оптической системы акустический сигнал попадает на оптико-акустический генератор, в котором возбуждается короткий ультразвуковой импульс. Данный импульс направляется в объект исследования, где происходит облучение исследуемой среды. Акустический сигнал проникает вглубь образца и с последующим отражением или рассеянием акустических сигналов на дефектах структуры материала. При помощи пьезоприемника осуществляется пьезорегистрация для последующего анализа зарегистрированных сигналов.

Промежуточные результаты

1. Изготовлены специализированные датчики для проведения ультразвукового контроля пайки и комплект образцов.
2. Определены условия применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики.
3. Проведен ряд экспериментов, позволяющие сделать вывод о возможности применимости для оценки обнаружения дефектов в тонкостенных паяных соединениях камер ЖРД методом лазерно-ультразвуковой диагностики.

Основной результат, практические результаты. Обоснована применимость метода лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля качества паяных соединений на примере камер ЖРД.

**АНАЛИЗ ПРИРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА,
КАК ИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА ПРИ КОНТРОЛЕ БАКОВЫХ ОТСЕКОВ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Д.С. Ашихин, А.А. Поляков, И.Ю. Кинжагулов
Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров**

Введение. В настоящее время остается нерешенным вопрос контроля качества кольцевых соединений баковых отсеков перспективных РКН, выполненных фрикционной сваркой (ФС). Для решения этой задачи наиболее приемлемым является метод лазерно-ультразвуковой дефектоскопии. Проведенные экспериментальные исследования на образцах толщиной 3,85 мм показывают, что для распознавания дефекта недостаточно информативных параметров амплитуды и времени прихода оптоакустических сигналов. Предлагается в качестве дополнительных диагностических параметров использовать приращение энергии ультразвуковых импульсов.

Постановка задачи. Проанализировать адекватность использования информативных параметров приращения энергии оптоакустического сигнала при проведении эксперимента на образцах толщиной 3,85 мм.

Практические результаты. Проведен ряд экспериментов на образцах бездефектных и с пропилами. Результаты доказывают возможность обнаружения дефектов типа «непровар» в корне сварного шва соединений, выполненных ФС-методом лазерно-ультразвуковой дефектоскопии.

УДК 53.082.4

**О ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛАХ ИЗДЕЛИЙ**

**В.А. Быченко, М.С. Никитина
Научный руководитель – д.т.н., профессор М.Я. Марусина**

Краткое вступление, постановка проблемы. Причиной остаточных напряжений являются неодинаковые линейные или объемные деформации соседних объемов металла, для которых характерно то, что они существуют внутри конструкции (изделия) без приложения внешних усилий. Различия остаточных напряжений, возникающих при разных технологических процессах, проявляются в характере их распространения по макро- и микрообъемам изделия, а также в конкретных факторах, приводящих к неоднородным деформациям. При высокотемпературных технологических операциях, к которым относится и сварка, протекают взаимосвязанные процессы, приводящие к неоднородным деформациям, т.е. появлению остаточных напряжений:

- термомодеформационная история металла (термомодеформационный цикл), являющаяся основным технологическим фактором, влияющим на прочностные характеристики конструкции;
- неоднородные структурные превращения в металле шва и в зонах термодинамического влияния (они воздействуют на механические свойства в разных зонах сварного соединения и на сопротивляемость образованию холодных трещин);

– изменение растворимости газов, окружающих сварной шов (явление водородной хрупкости и старения).

При современных подходах к анализу состояния конструкции в ходе ее изготовления и эксплуатации необходима поэтапная оценка ее напряженного состояния с учетом начальных напряжений, возникающих от технологических операций изготовления и последующего наложения эксплуатационных термических и механических нагрузок.

Цель работы. Оценка остаточных напряжений в специальных материалах ответственных изделий методом лазерно-ультразвуковой диагностики.

Базовые положения исследования. Одна из основных сложностей метода лазерно-ультразвуковой диагностики заключается в том, что относительное изменение скорости звука, даже при напряжениях на пороге текучести, невелико, как правило, не превышает нескольких процентов. При типичных напряжениях порядка 100 МПа относительное изменение скоростей упругих волн лежит в диапазоне 10^{-3} – 10^{-4} . Поэтому требуется высокая точность измерения скорости звука, которую нужно измерять достаточно локально. Такой прецизионной точности можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики. В ходе исследования проведен ряд экспериментов по контролю (оценке) остаточных напряжений на образцах из стали марки АК.

Промежуточные результаты

1. Разработан специализированный датчик для контроля (оценки) остаточных напряжений в специальных материалах ответственных изделий.
2. Определены условия применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики.
3. Проведен ряд экспериментов, позволяющие сделать вывод о возможности применимости для оценки остаточных напряжений метода лазерно-ультразвуковой диагностики.
4. Экспериментально подтверждена выявленная теоретически линейная зависимость скорости распространения ультразвуковых колебаний от одноосных механических напряжений растяжения – сжатия в упругой стадии работы стали.
5. Произведено технико-экономическое обоснование применения данного метода контроля.

Основной результат, практические результаты. Обоснованы применимость и технико-экономическая результативность метода лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля остаточных напряжений в специальных материалах ответственных изделий.

УДК 62-791.2

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

С.В. Вдовенко, М.С. Малеванная

Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.Д. Аникейчик

Введение. Анализ состояния используемой в настоящее время при стендовой отработке изделий информационно-измерительной системы (ИИС) показал следующее:

- существующие аппаратно-программные средства автоматизации измерений, внедренные в 80-х годах прошлого века, выработали свой ресурс, морально и физически устарели. Качество получаемой с их помощью информации не соответствует современным требованиям, велик процент ручной обработки, не выполняются требования по оперативности обработки данных;

– интенсивно развивающиеся в настоящее время новые измерительные и информационные технологии, требуют применения принятых в мире стандартных, унифицированных решений, обеспечивающих соответствующий технический уровень интеграции и позволяющих осуществлять стендовую отработку изделий на единой программно-технической базе.

Целью работы является повышение надежности ИИС для огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей на основе ее модернизации с использованием VХI оборудования.

Базовые положения исследования. Определение направления модернизации с учетом заимствования оборудования, находящегося в эксплуатации. Обоснование применения нового оборудования с учетом особенностей ИИС. Обоснование структуры и состава ИИС.

Переход на современную элементную базу датчиков и датчико-преобразующую аппаратуру (ДПА) возможен только на основе применения новых модульных мультимикропроцессорных аппаратно-программных средств (АПС). При этом использование существующих датчиков и ДПА при переходе на современные АПС является переходным этапом и способствует снижению дополнительных материальных затрат на данном этапе создания новой ИИС. Применение современных АПС с заимствованными датчиками и ДПА в составе новой ИИС на данном этапе является обоснованным решением, так как первые обеспечивают возможность интегрирования с современными датчиками и ДПА, наращивания по числу измерительных каналов и производительности без существенных конструктивных изменений.

Практические результаты. В настоящее время ИИС на базе аппаратуры в стандартах VХI изготовлена. С целью повышения надежности функционирования новой ИИС ВЛ необходимо обучение персонала правилам эксплуатации систем измерения на базе аппаратуры в VХI стандарте, с разработкой рекомендаций по эксплуатации модернизированной ИИС, провести отработки ИИС совместно с информационно-измерительной локально-вычислительной сетью (ИИ ЛВС) для оценки корректности и точности функционирования программного обеспечения.

УДК 621.382.2/3

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ

А.А. Каткова

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Пеньков

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Рассмотрена задача исследования соответствия модели Джилса–Атертона для магнитных материалов характеристикам, полученным с помощью установки контроля магнитных параметров.

Введение и постановка проблемы. Индуктивные элементы можно отнести к наиболее значимым компонентам силовой электроники. Обычно эти компоненты изготавливаются с использованием различных ферромагнитных материалов.

Следует отметить, что разработка индуктивных элементов является трудоемким и сложным техническим процессом, требует длительного времени и значительных затрат. Поэтому важной задачей становится возможность предсказания эксплуатационных

характеристик. Также, в ряде случаев невозможно провести полномасштабные испытания тех или иных устройств, включающих индуктивные элементы. Современным решением становится моделирование.

Исследование научно-технической литературы и программ моделирования показало, что для большинства отечественных силовых элементов, в особенности магнитопроводов, модели либо отсутствуют, либо не являются достоверными, т.е. подтвержденными измерениями параметров реальных образцов. Поэтому проектирование модели магнитопровода становится актуальной задачей современной силовой электроники.

Целью исследования стали определение и задание параметров модели Джилса–Атертона для кольцевых сердечников различных материалов, сравнение полученной модели с реальными характеристиками.

Условия проведения исследования. Решение поставленной задачи требует учета параметров и характеристик, которые могут быть получены с помощью современных измерительных устройств, таких как универсальная вычислительная установка контроля магнитных параметров УКМП-0.05-100, которую можно использовать как в лабораториях, так и в заводских условиях.

Основным направлением работы установки является измерение с высокой точностью динамических магнитных характеристик. Текущая модель обеспечивает задание следующих параметров, необходимых для проведения измерений: частоты; тока намагничивания или напряженности магнитного поля; формы испытательного сигнала.

Использование установки контроля магнитных параметров позволяет отслеживать правильность алгоритмов, используемых при моделировании, а так же оценивать степень соответствия модели реальному образцу.

В SPICE симуляторах, для моделирования ферромагнитных сердечников, наиболее часто используется модель Джилса–Атертона. Для описания изменения поляризации в зависимости от амплитуды внешнего поля в диэлектриках используется заимствованная из теории магнетизма функция Ланжевена [1].

Результаты исследования. С помощью установки УКМП были получены результаты измерений и моделирования петли гистерезиса для магнитопровода. На основе полученных параметров и характеристик, подобраны коэффициенты модели Джилса–Атертона для ряда различных магнитопроводов.

Моделирование проведено в системе схемотехнического проектирования DxDesignerMentor Graphics.

Полученная модель в целом адекватно отражает форму и поведение зависимости $B(H)$. Однако следует заметить, что функция Ланжевена в области насыщения растет достаточно медленно, чем обусловлен зазор на горизонтальных участках петли. Такое поведение в области насыщения является главным недостатком модели. Приблизить характеристики модели к характеристикам реального магнитопровода можно, дополнив существующую модель. В частности, возможна замена функции Ланжевена экспоненциальной функцией насыщения [2], что особенно актуально для материалов с высокой проницаемостью.

Также следует отметить, что базовая модель Джилса–Атертона не зависит от частоты перемагничивания и температуры окружающей среды. Т.е. применение модели ограничивается только заранее известными условиями эксплуатации.

Измеряемые с помощью УКМП параметры могут быть в дальнейшем использованы для построения усовершенствованной модели, с высокой точностью отражающей свойства реального магнитопровода.

Литература

1. Peter Reid Wilson. Modeling and simulation of magnetic components in electric circuits. – University of Southampton. Department of electronics and computer science. – 2001. – 289 с.
2. Лукичев А.А., Ильина В.В., Щекина Г.Б. Простая функция насыщения поляризации, учитывающая инерционность диэлектриков // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2006. – С. 82.

УДК 535.3 + 517.926.4 + 519.642.7

ИК-ТОМОГРАФИЯ ГОРЯЧЕГО ГАЗА: АКТИВНО-ПАССИВНАЯ ДИАГНОСТИКА, ОСЕВАЯ СИММЕТРИЯ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

А.А. Макарова

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.С. Сизиков

Введение. Рассматривается задача инфракрасной (ИК) томографии [1] горячего газа (пламени горелки, плазмы, газа, вытекающего из сопла ракеты, и т.д.). Эта задача имеет сходства и различия с рентгеновской компьютерной томографией (РКТ) [2]. В РКТ используется активный режим (назовем его режимом ON), когда источниками через сечение среды пропускаются узконаправленные лучи некоторой интенсивности I_0 и на выходе детекторами (приемниками) измеряются интенсивности I . При этом учитывается лишь поглощение (абсорбция) лучей, в результате задача физически описывается законом Бугера–Ламберта–Бера, а математически – интегральным уравнением (ИУ) Радона относительно коэффициента абсорбции k . Уравнение Радона решается численно методом свертки и обратной проекции или другим методом.

В обратной задаче диагностики плазмы [2] используется как активный режим ON (просвечивание плазмы), так и пассивный режим (назовем его режимом OFF), когда источником излучения является сама плазма.

В задаче ИК-диагностики высокотемпературного (около 2000°C) газа нужно учитывать не только абсорбцию, но и эмиссию (излучение) газа. Однако обычно рассматривают только режим ON и в результате получают лишь одно (дифференциальное или интегральное) уравнение относительно двух искоемых функций: коэффициента абсорбции k и функции Планка среды B (по которой можно рассчитать температурный профиль среды T). Чтобы преодолеть эту сложность (одно уравнение и две искоемых функции), часто полагают [1], что коэффициент k измерен (некоторым образом), или используют базу данных HITRAN/HITEMP [3] или др. для определения k .

Цель работы. В работе для ИК-томографии горячего газа предлагается в эксперименте использовать два режима измерений: активный (ON) и пассивный (OFF). В результате будут получены два интегральных уравнения относительно двух функций k и B . Такая постановка задачи позволит обойтись без специального измерения функции k или без использования базы данных для ее определения, а даст возможность определить две функции k и B , а также T (в ряде сечений пламени и на ряде частот) путем численного решения двух интегральных уравнений.

Основные соотношения. Полагаем, что в каждой точке (x, y) сечения среды имеет место термодинамическое равновесие. Это дает возможность использовать закон Кирхгофа: коэффициент излучения $\varepsilon(x, y) = k(x, y) B(T(x, y))$ и получить дифференциальное уравнение переноса излучения относительно интенсивности излучения $I(x, y)$. Данное уравнение имеет аналитическое решение. Обозначив через I_R и I_g интенсивности, измеренные детекторами на выходе из среды в режимах ON и OFF соответственно, получим два интегральных уравнения

относительно $k(x, y)$ и $B(T(x, y))$ с измеренными $I_T = I_R - I_g$ и I_g . Эти уравнения могут быть решены (численно) последовательно: сначала будет определена $k(x, y)$, а затем $B(T(x, y))$.

В случае произвольного сечения полагаем, что функции I_T и I_g получены под несколькими ракурсами θ , т.е. измерены $I_T(x, \theta)$ и $I_g(x, \theta)$. Это дает возможность определить двумерные функции $k(x, y)$ и $B(T(x, y))$ по измеренным двумерным функциям $I_T(x, \theta)$ и $I_g(x, \theta)$ – ситуация, характерная для РКТ в том смысле, что в РКТ также измеряются и определяются обычно двумерные функции.

Случай осевой симметрии и параллельного сканирования. Однако в отличие от РКТ, где, как правило, изучается произвольная, несимметричная среда (например, сечение мозга), ИК-томография часто применяется к средам (газовый поток и др.), имеющим осевую симметрию, когда в каждом z -сечении пламени изолинии постоянных k и B (а также T и ϵ) являются окружностями. Кроме того, полагаем, что выполняется параллельное (одноракурсное) сканирование.

Получено два сингулярных интегральных уравнения (СИУ) типа Абеля: одно относительно $k(r)$ по измеренной $I_T(x)$ и другое относительно $B(r)$ по измеренной $I_g(x)$, где r – расстояние от z -оси симметрии. После получения $B(r)$ можно вычислить температурный профиль $T(r)$.

Для численного решения обоих сингулярных уравнений предложены модификации обобщенного метода квадратур [4]. Суть метода состоит в использовании обобщенной квадратурной формулы левых прямоугольников для сингулярностей $r/\sqrt{r^2 - x^2}$ и $1/\sqrt{r^2 - x^2}$. При этом матрицы получаемых систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) являются треугольными и решение каждой СЛАУ находится рекуррентно.

Задача решения полученных интегральных уравнений первого рода является, строго говоря, некорректной (неустойчивой). Поэтому для повышения устойчивости применен метод регуляризации Тихонова [5]. При этом, чтобы уменьшить шаг дискретизации по x , а также сгладить погрешности исходных данных, были использованы кубические сглаживающие сплайны.

Программное обеспечение и обработка экспериментальных данных. Разработан пакет программ на MatLab7. С его помощью выполнена обработка экспериментальных данных активно-пассивной ИК-томографии пламени горелки на некоторой частоте ν в некотором сечении пламени для случая осевой симметрии пламени и параллельного сканирования его. Используются измеренные функции $I_R(x)$, $I_g(x)$ и $I_T(x)$, а рассчитаны коэффициент абсорбции $k(r)$, функция Планка $B(r)$ и температурный профиль $T(r)$ для сечения пламени горелки.

Особенностью изложенной методики является то, что в ней использована как активная, так и пассивная диагностика горячего газа, что позволяет определить две функции: коэффициент абсорбции $k(r)$ и температурный профиль $T(r)$ без специального измерения функции k или без использования базы данных для ее определения.

Литература

1. Tourin R.H., Krakow B. Applicability of infrared emission and absorption spectra to determination of hot gas temperature profiles // Appl. Optics. – 1965. – V. 4 – № 2. – P. 237–242.
2. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. – Новосибирск: Наука. – 1987. – 239 с.
3. Fleckl T., Jäger H., Obernberger I. Experimental verification of gas spectra calculated for high temperatures using the HITRAN/HITEMP database // J. Phys. D: Appl. Physics. – 2002. – V. 35. – P. 3138–3144.

4. Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Численное решение сингулярного интегрального уравнения Абеля обобщенным методом квадратур // Изв. вузов. Математика. – 2004. – №8(507). – С. 62–70.
5. Сизиков В.С. Интегральные уравнения и MatLab в задачах томографии, иконки и спектроскопии. – СПб: Saarbrucken: LAP. – 2011. – 252 с.

УДК 620.17

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА И СРЕДСТВ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ

М.П. Марусин

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров

Краткое вступление, постановка проблемы. Существует необходимость производить контроль свойств не просто материалов или образцов-свидетелей, а непосредственно изделий без их повреждения или разрушения. Анализ показывает, что основными методами контроля свойств эластомеров остаются методы индентирования, основанные на динамическом или статистическом вдавливании индентора в испытуемый материал и оценке свойств материала по параметрам вдавливания – величине контактного усиления. К этим методам относятся измерение твердости и эластичности по отскоку. Существующие методы не позволяют получить полную информацию о свойствах материала. Фактически этими приборами снимается одна точка на релаксационной кривой, что явно не достаточно для определения состояния материала или прогнозирования его поведения в будущем. Поэтому проблема создания относительно недорогих контрольных приборов, которые бы позволяли получать более полную и достоверную информацию о свойствах материалов, дающих возможность оценить не только упругие, но и вязкие свойства материалов, является весьма актуальной.

Цель работы. Обоснование применимости метода и средств динамического индентирования для прогнозирования остаточного ресурса изделий.

Базовые положения исследования. Наряду с известными методами оценки эластомеров, основанных на индентировании, рассмотрим метод динамического индентирования. Метод заключается в нанесении индентором испытательного удара по контролируемому объекту и непрерывной регистрации процесса контактного взаимодействия индентора с материалом. При такой реализации метод позволяет получить не только конечные параметры удара (максимальное внедрение индентора в материал, скорость отскока и т.д.), но и осуществить регистрацию зависимости контактное усилие – внедрение, являющуюся аналогом диаграммы напряжение – деформация. Данная зависимость является основным источником информации о материале и наиболее полно отражает его свойства, являясь функцией не только упругих, но и вязких характеристик. Основным преимуществом метода динамического индентирования является большая информативность вследствие возможности дополнительно анализировать свойства материалов, которые проявляются только в условиях нестационарного ударного нагружения.

Промежуточные результаты

1. Разработан специализированный датчик для контроля (оценки) твердости в специальных материалах.
2. Определены условия применения метода динамического индентирования.

3. Проведен ряд экспериментов, позволяющие сделать вывод о возможности применимости для оценки твердости специальных материалов методом лазерно-ультразвуковой диагностики.

Основной результат, практические результаты. Обосновано применение метода и средств динамического индентирования для прогнозирования остаточного ресурса изделий.

УДК 004.032.26

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ К ВАРИАЦИЯМ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Д.А. Павлов

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Ю. Пучков

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Во многих областях науки и техники часто возникают задачи, когда по имеющимся выходным данным некоторого объекта требуется установить входные воздействия, которые вызвали соответствующую реакцию объекта. К таким задачам относятся различные виды диагностики в медицине, геологоразведке, технике. По структуре постановки такие задачи относятся к некорректно поставленным обратным задачам, методы решения которых, благодаря их востребованности, продолжают представлять интерес для исследователей.

Из трех условий корректно поставленной задачи (существование решения, единственность решения, устойчивости решения по отношению к малым вариациям данных задачи) в обратных задачах наиболее часто нарушается последнее. В связи с этим, целью исследования автора является разработка и реализация метода снижения влияния вариации исходных данных на результат решения обратной задачи.

Многообразие типов обратных задач привело к созданию соответствующих методов их решения, учитывающих специфику постановки той или иной задачи. Предлагаемый вариант решения этих задач базируется на применении искусственных нейронных сетей. Основная идея предлагаемого подхода к снижению чувствительности решения обратной задачи к вариациям исходных данных состоит в предварительном применении алгоритма нечетко-логического метода оценки состояния системы исследуемой системы, а именно нечеткого фильтра Калмана. Порядок решения состоит в следующем: данные с выхода исследуемого объекта поступают на фильтр, а с него передаются на нейронную сеть, с выхода которой снимается оценка входных данных объекта. Для получения этой оценки нейронная сеть предварительно обучается на наборе данных, получаемом путем подачи известных данных на вход объекта и регистрации соответствующей выходной реакции.

Применение фильтра Калмана позволяет использовать часть априорной информации и в свою очередь, снизить неопределенность данных для решения обратной задачи нейронной сетью. При расчете фильтра Калмана необходимо иметь модель исследуемого объекта, которую называют формирующим фильтром. Не всегда эту модель можно получить на основе применения физических законов, связывающих исследуемые параметры. Например, для экономических объектов такой подход не срабатывает, так как отличительной чертой источников информации о них является субъективизм, а в ряде случаев и противоречивость данных. В этих условиях, для решения отмеченной проблемы используются методы искусственного интеллекта, а именно методы нечеткой логики, которые позволяют успешно преодолевать отмеченные особенности исходной информации.

Предложенный подход был положен в основу алгоритма программы, реализованной в среде MATLAB. Проведенные численные эксперименты показали, что применение

предварительной фильтрации данных, поступающих на вход нейронной сети, позволяют снизить среднеквадратичную ошибку определения решения, тем самым уменьшить влияние изменений исходных данных на результат решения обратных задач.

Разработанная программа может быть использована как самостоятельно, так и как отдельный модуль в составе более крупных программных комплексов поддержки принятия решений для различных прикладных областей, в том числе и экономических, где решения базируются на обработке большого количества статистических данных и данных, имеющих не числовое, а лингвистическое описание.

УДК 53.082.4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ СТАБИЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ ИЗДЕЛИЙ

Д.С. Пан, И.С. Разводовский

Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.Д. Аникейчик

Введение. Одной из причин снижающих достоверность контроля измерений остаточных напряжений методом лазерно-ультразвуковой диагностики является недостаточность обеспечения стабильного акустического контакта между датчиком и объектом контроля (ОК). К основным факторам, влияющим на обеспечение акустического контакта относятся:

- шероховатость поверхности исследуемого ОК;
- влияние усилия прижима датчика к поверхности ОК;
- позиционирование датчика относительно нормали к поверхности ОК в точке контроля;
- соответствие формы поверхности датчика, форме поверхности ОК;
- количество иммерсионной жидкости между рабочей поверхностью датчика и ОК.

Таким образом, для проведения достоверного контроля остаточных напряжений методом лазерно-ультразвуковой диагностики необходим учет выше перечисленных факторов для каждого ОК.

Цель работы. Обеспечение стабильного акустического контакта при неразрушающем контроле остаточных напряжений в специальных материалах изделий.

Базовые положения исследования. Одна из основных особенностей обеспечения стабильного акустического контакта при проведении лазерно-ультразвуковой диагностики остаточных напряжений является большое разнообразие геометрических характеристик ОК. Поэтому для проведения достоверного контроля остаточных напряжений требуется внесение соответствующих корректировок в методику контроля остаточных напряжений методом лазерно-ультразвуковой диагностики, позволяющих обеспечить акустический контакт для каждого конкретного ОК.

Промежуточные результаты

1. Разработаны специализированные датчики для контроля (оценки) остаточных напряжений в специальных материалах ответственных изделий.
2. Разработаны оснастки датчиков для соответствующих ОК обеспечивающие стабильность акустического контакта при контроле остаточных напряжений.
3. Обеспечены условия применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля остаточных напряжений.

4. Проведены эксперименты, позволяющие сделать вывод о стабильности акустического контакта.

Основной результат, практические результаты. Определены и экспериментально обоснованы технические предложения по обеспечению стабильного акустического контакта при неразрушающем контроле остаточных напряжений в специальных материалах изделий.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РУБАШКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.М. Перфилов

(ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. академика В.П. Глушко», Химки, Московская обл.)

Научный руководитель – В.А. Калошин

(ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. академика В.П. Глушко», Химки, Московская обл.)

Введение. Конструкции, получаемые при помощи пайки, нашли широкое применение в ракетном двигателестроении. Одним из дефектов, возникающих в процессе производства жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), является заплывание каналов рубашки охлаждения. Как альтернатива применения калибровочной проволоки был предложен метод контроля при помощи видеоскопических систем.

Постановка задачи. Разработать технологию контроля заплывания каналов рубашки охлаждения ЖРД с помощью видеоскопических систем.

Практические результаты. В ходе работ проведен ряд экспериментов по обнаружению дефектов типа заплывание каналов рубашки охлаждения ЖРД на предприятии ракетного двигателестроения ОАО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. академика В.П. Глушко».

УДК 534-16+535

ВЛИЯНИЕ ЗАТУХАНИЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ПРИ КОНТРОЛЕ ФРИКЦИОННОЙ СВАРКИ

А.А. Поляков, Д.С. Ашихин, И.Ю. Кинжагулов

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров

Введение. В настоящее время активно разрабатываются и внедряются новые технологии неразрушающего контроля (НК) качества изделий ракетно-космической техники (РКТ), основанные на применении современных методов и средств обнаружения, распознавания и оценки размеров дефектов. Анализ технологии изготовления кольцевых сварных швов лейнеров из материала АМгб с применением фрикционной сварки (ФС), показывает, что недостаточная проработка вопросов контроля качества, является сдерживающим фактором на пути широкого внедрения в производство изделий РКТ. Одним из перспективных современных методов НК сварных соединений является лазерно-ультразвуковая дефектоскопия. С учетом этого, представляется целесообразным проведение исследований, направленных на разработку методики дефектоскопии кольцевого сварного соединения лейнера получаемого ФС.

Постановка задачи. Проанализировать зависимость энергетического параметра от затухания оптико-акустического сигнала и на основе полученных данных сделать вывод о

дефектности сварного соединения.

Практические результаты. В ходе работ проведен ряд экспериментов по обнаружению дефектов сварного шва лейнера с помощью метода лазерно-ультразвуковой дефектоскопии. Результаты экспериментов доказывают возможность обнаружения дефектов сварного шва, выполненного фрикционной сваркой, на основании анализа зависимости энергетического параметра от затухания оптико-акустического сигнала.

УДК 62-503.55

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ РКТ

Д.С. Сергеев, М.Н. Шугаев

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров

Введение. В настоящий момент проблема контроля качества паяных соединений сопел двигателей является актуальной. Осуществление ручного контроля паяных соединений лазерно-ультразвуковым методом имеет ряд недостатков: позиционирование датчика относительно поверхности контроля, высокая трудоемкость контроля, и т.д.

Цель работы. Повышение достоверности результатов контроля, качества паяных соединений тонкостенных геометрически сложных конструкций.

Практические результаты. Обеспечено постоянство акустического контакта на геометрически сложных поверхностях, обеспечена сплошность контроля объекта контроля, выявление несплошностей (неспаев, непропаев, отрывов) ребер стенки внутренней.

Полученные результаты доказывают возможность автоматизированного контроля паяных соединений изделий РКТ.

УДК 621.316.82

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛОГОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ ОТ НОМИНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

В.А. Смолин

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Научный руководитель – к.т.н., доцент Ю.В. Троицкий

(Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске)

Необходимость прецизионного измерения относительных отклонений сопротивления встречается, прежде всего, при калибровке прецизионных резисторов, а также при тензометрических исследованиях. В обоих случаях максимальное значение отклонения может лежать в пределах десятых долей процента. По способу включения исследуемого резистора различают мостовые и потенциометрические схемы включения. В качестве источника возбуждения в них могут использоваться источники напряжения или источники тока. К входам внешнего опорного напряжения аналого-цифрового преобразования (АЦП) может подключаться или напряжение источника возбуждения или падение напряжения на резисторе, включенном последовательно с используемой измерительной схемой.

Одной из проблем является выбор конкретной измерительной схемы который

определяется, прежде всего, требуемой погрешностью измерения. Эта погрешность зависит как от разрешающей способности АЦП, так и от коэффициента использования диапазона преобразования определяемого выбранной структурой измерительной схемы. Проведенный сравнительный анализ показал, что среди мостовых схем наихудший результат по достижимой разрешающей способности имеет наиболее распространенная схема с использованием в качестве опорного напряжения источник возбуждения.

Целью работы является выработка рекомендаций по выбору схемотехнических решений, обеспечивающих требуемую эффективную разрешающую способность АЦП относительного изменения приращения сопротивления прецизионных резисторов.

Базовыми положениями исследования являются: анализ различных логотрических схем включения контролируемого резистора с различными источниками возбуждения для оценки предельного значения эффективной разрешающей способности АЦП.

Промежуточными результатами при написании работы являются:

- систематизация существующих схем включения поверяемых резисторов;
- выработка критериев оценки эффективной разрешающей способности АЦП рассматриваемого параметра.

Основным результатом работы является:

- разработка методики выбора оптимальной схемы АЦП относительного приращения сопротивления резисторов;
- разработка схемы включения резисторов обеспечивающую более высокую разрешающую способность АЦП по сравнению с существующими решениями.

Практическим результатом является создание схемы измерения приращения сопротивления тензорезистивных датчиков, обеспечивающую погрешность измерения не более 0,1% на базе микросхемы ADuC7060.

УДК 681.2; 615.841; 616.71

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Д.В. Толкович

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Козаченко

Интеллектуальная деятельность является одной из наиболее сложно организованных психических функций и, в то же время, одной из специфических потребностей человека. Процесс интеллектуальной деятельности непосредственно связан с мгновенным или постепенным изменением значительного числа психофизиологических параметров, характеризующих состояние организма человека в данный момент времени. Решение задач диагностики и прогнозирования состояния человека, как правило, основано на использовании компьютерного моделирования и новых подходов к обработке физиологических сигналов и медицинских изображений. Автоматизированные компьютерные методы диагностики подразумевают получение диагностической информации по результатам измерения различных характеристик, какой-либо части организма. Такая информация отражает состояние различных функциональных систем организма и носит опережающий характер, т.е. позволяет делать оперативный прогноз функционального состояния какой-либо части организма. Необходимо также отметить, что существующие (принятые в современной электроэнцефалографии) методы обработки электрофизиологических сигналов мозговой активности накладывают принципиальные ограничения на характер регистрируемых процессов, в частности, подразумевают их стационарность. При этом, как известно, именно нестационарные переходные режимы в физиологических сигналах содержат основную информацию о состоянии сердечно

сосудистой системы и структур мозга.

Поэтому перед нами встала задача разработки и создания информационно-измерительного комплекса для регистрации и последующего изучения нестационарных психофизиологических показателей человека в процессе напряженной интеллектуальной деятельности. Принципиальным отличием разрабатываемого комплекса от существующих аналогов должно быть обеспечение полноценной синхронизации по времени между всеми контролируемыми параметрами (электроэнцефалограммы, электрокардиограммы, пневмограммы, аудио- и видеосигналы и т.д.).

Разработанный комплекс создан на основе энцефалографа с современным программным обеспечением. Предполагается, что возможности энцефалографа, применяемые для диагностики и обработки электрофизиологических сигналов от различных пространственных зон и структур мозга, будут дополнены и расширены блоком обработки нестационарных сигналов.

Разработанный комплекс состоит из нескольких основных и вспомогательных модулей. К основным модулям следует относить модуль регистрации, основной компьютер, модуль инструкций, аудиозапись и видеозапись, задействованные на любом этапе работы с комплексом. Кроме того, в соответствии с определением биотехнической системы, к основным модулям комплекса следует отнести испытуемого и оператора. К дополнительным модулям относятся модуль стимуляции, модуль спектроанализатора, измерение давления (тонометр).

Научные результаты, полученные на разрабатываемом комплексе, могут иметь базовое значение для специалистов в области искусственного интеллекта, а также для нейрофизиологов, занимающихся изучением нераскрытых психофизиологических механизмов интеллектуальной деятельности.

Работа выполнена в ходе выполнения НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме «Исследование нестационарных физиологических сигналов и изображений при интеллектуальной деятельности с помощью многофункционального диагностического измерительного комплекса».

УДК 528.526.6

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА ПОКАЗАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

С.А. Волковский, М.В. Мехреньгин, И.А. Шарков, О.А. Шаркова

Научные руководители:

д.т.н., профессор И.К. Мешковский; к.ф.-м.н., профессор В.Е. Стригалева

Краткое вступление, постановка проблемы. Уже три десятилетия волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) успешно используются в системах навигации, ориентации и стабилизации. За это время технологии изготовления оптических компонентов были значительно улучшены, что позволило ВОГ перейти из ниши датчиков угловой скорости средней точности к классу датчиков навигационной точности. На сегодняшний день прецизионные ВОГ вытесняют кольцевые лазерные гироскопы класса точности $0,01-0,001^\circ/\text{ч}$ и используются в навигационных системах морского, наземного и аэрокосмического базирования. Потенциальная точность такого ВОГ составляет $7 \cdot 10^{-4}^\circ/\text{ч}$.

Основная проблема заключается в том, что при кажущейся простоте прибора и высокой чувствительности его к угловой скорости вращения он в то же время чрезвычайно подвержен различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. К таким воздействиям относятся нестационарные

температурные поля, акустические шумы и вибрации, переменные электрические и магнитные поля и т.д. В процессе эксплуатации в рабочем диапазоне температур ВОГ испытывает широкодиапазонную и динамическую тепловую нагрузку, которая оказывает значительное влияние на его выходную характеристику.

В волоконно-оптическом гироскопе (ВОГ) при длине оптического волокна в 1 км от колебаний температуры в пределах $0,01^{\circ}\text{C}/\text{час}$ может возникать дрейф показаний, соизмеримый со скоростью вращения земного шара. Как показали исследования, при симметричном распределении температур относительно середины катушки колебания температуры практически не сказываются на выходном сигнале, поэтому один из способов предупреждения дрейфа – оптимальная намотка оптического волокна (квадрупольная). Однако, только конструктивных методов борьбы с температурной зависимостью выходного сигнала ВОГ недостаточно для обеспечения точности показаний ВОГ на уровне $0,01^{\circ}/\text{ч}$.

Проблема влияния изменения температуры на выходной сигнал ВОГ, в дополнении к уже реализованным в конструкции ВОГ методам борьбы, может быть решена двумя способами: термостатированием прибора и введением температурной компенсации выходного сигнала.

Второй способ является более предпочтительным, так как не приводит к увеличению габаритов, энергопотребления и позволяет значительно уменьшить влияние температуры на выходной сигнал, а также сократить время готовности прибора.

Цель работы. Разработка и внедрение динамической модели компенсации выходного сигнала гироскопа, учитывающей влияние температуры на элементы ВОГ и пространственно-временного градиента температур внутри волоконно-оптической катушки.

Базовые положения исследования. Компенсация температурного дрейфа ВОГ, факторный анализ, нейронные сети.

Промежуточные результаты. Исследованы и выбраны наиболее подходящие методы, материалы и технологии для создания системы датчиков температуры, интегрируемой в ВОГ. Реализована аппаратная и программная части комплекса, состоящего из 9 датчиков: 1 для измерения температуры МИОС и 8 для измерения градиента температур в волоконно-оптической катушке.

Основной результат. В настоящее время разработанные методы компенсации исследуются на эффективность в экспериментальных образцах ВОГ. На основе данных, получаемых с датчиков температуры, производится корректировка работы модулятора, ведутся исследования по компенсации температурного воздействия на показания ВОГ.

Корректировка воздействия влияния температуры на оптические характеристики МИОС и волоконно-оптической катушки позволяют приблизиться к запланированной точности прибора $0,01^{\circ}\text{C}/\text{час}$ в условиях промышленного применения ВОГ.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ ИЗДЕЛИЙ

И.В. Беркутов, И.Е. Щерба

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Фёдоров

Краткое вступление, постановка проблемы. Наличие остаточных напряжений в материале изделий существенным образом влияет на их усталостную прочность, безотказность и долговечность надежных, на первый взгляд, изделий в технике. Несмотря на актуальность проблемы измерения остаточных напряжений в металлах и сварных швах, а также значительных усилий, направленных на ее решение, на нынешний день так и не существует универсального метода, дающего распределение трехосных остаточных напряжений по всему объему напряженного тела. Причиной этому, прежде всего, является относительно слабое влияние остаточных напряжений на изменение упругих и теплофизических свойств напряженной среды (плотности, теплопроводности, скорости звука, электропроводности, электрической и магнитной восприимчивостей и т.д.). Как правило, максимальные изменения свойств среды, связанные с наличием остаточных напряжений, составляют десятые доли процента по сравнению с ненапряженными состояниями. Т.е., чтобы исследовать остаточные напряжения, необходимо измерять характеризующие их теплофизические и упругие свойства среды с прецизионной точностью, что в свою очередь накладывает существенные ограничения на применение того или иного неразрушающего метода.

Цель работы. Изучение различных методов измерения остаточных напряжений. Сравнение результатов. Анализ существующих методов контроля остаточных напряжений для применения в различных материалах изделий.

Базовые положения исследования. Известно, что технологические остаточные напряжения могут возникнуть в результате механических, термических и термомеханических воздействий на изделия из металлов и сплавов.

Среди важных достижений в исследовании остаточных напряжений можно выделить результаты, представленные в работах И.А. Биргера, Н.Н. Давыденкова, А.А. Дубова, М.И. Евстигнеева, С.Ю. Иванова, А.И. Исаева, В.В. Клюева, Э.А. Кочаров, Б.А. Кравченко, А.А. Маталина, Ж.А. Мрочака, А.Н. Овсенко, И.А. Одингга, В.В. Трофимова и др.

Установлено, что последствие технологических остаточных напряжений при превышении допустимых значений в изделиях могут вызвать трещины и остаточные деформации, приводящие к короблению с соответствующей потерей точности формы или взаимного расположения поверхностей. При уровне напряжений в пределах допустимых значений видимых изменений не произойдет, но при совпадении знака эксплуатационных нагрузок со знаком напряжений произойдет разрушение изделия при нагрузках, меньших расчетных. Существующие методы определения остаточных напряжений делятся на неразрушающие и разрушающие. К первым методам относятся акустический, магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный и др. Перечисленные методы имеют целый ряд ограничений по исследуемым материалам (алюминиевые, титановые, никелевые и сложнолегированные сплавы) и по возможности построения эпюры механических напряжений.

К разрушающим методам относятся химический, метод послойного удаления материала, метод сверления отверстия, метод Кардиано и Салерано и др. Разрушающим методом не представляется возможным проводить сплошной контроль деталей, поскольку требуется полное или частичное разрушение зачастую дорогостоящих изделий.

Промежуточные результаты

1. Определены условия применения метода лазерно-ультразвуковой диагностики.
2. Проведен ряд экспериментов, позволяющих сделать вывод о возможности применения для оценки остаточных напряжений в материалах изделий метода лазерно-ультразвуковой диагностики.
3. Произведено сравнение метода лазерно-ультразвуковой диагностики с тензометрическим и рентгеновским методами.
4. Проведен анализ полученных результатов исследования.

Основной результат. Обоснованы преимущества метода лазерно-ультразвуковой диагностики при контроле остаточных напряжений в материалах изделий.