

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

**В.П. Вавилов**, Томский политехнический университет, д-р. техн. наук, проф.

**Д.А. Нестерук**, Томский политехнический университет, канд. техн. наук, доц.

*В статье описаны результаты базовых исследований в области ультразвуковой и индукционной инфракрасной термографии. Используемые методы выступают в качестве альтернативы традиционному активному тепловому контролю с применением оптического нагрева. Исследования проведены в Томском политехническом университете.*

**Ключевые слова:** инфракрасная термография, ультразвуковая стимуляция, индукционный нагрев, композиционный материал, усталостная трещина, ударное повреждение.

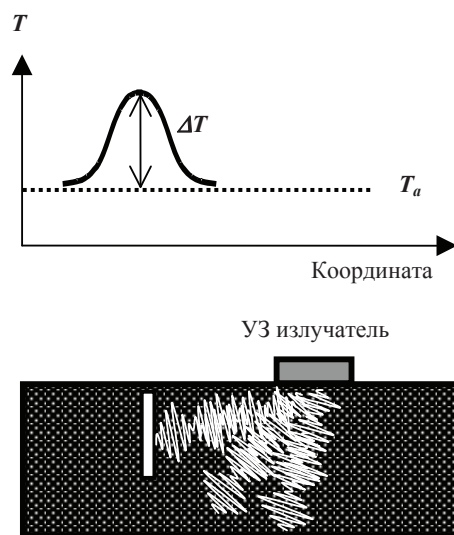
**Введение.** В течение многих лет активный инфракрасный (ИК), или тепловой, неразрушающий контроль (ТНРК) использовал преимущественно оптическую стимуляцию объектов испытаний с помощью импульсных ксеноновых и галогеновых ламп [1]. В силу физики теплопроводности, в односторонних процедурах ТНРК эффективность выявления скрытых дефектов резко ухудшается с увеличением глубины их залегания. Для обнаружения глубоких и/или малых дефектов необходимо увеличивать мощность стимуляции, что чревато возможным разрушением объекта контроля. Еще одним недостатком оптического нагрева является высокая степень отражения излучения нагрева при ТНРК металлов. В последние годы наблюдается существенный рост интереса к ультразвуковой (УЗ) и индукционной ИК термографии как методам, которые могут частично решить проблемы традиционного теплового контроля. Следует заметить, что данные методы не могут рассматриваться в качестве абсолютно новых. Так, еще в 1968 г. Д. Грин описал систему ТНРК тепловыделяющих элементов, в которой цилиндрические образцы нагревались индуктором [2]. В 80-х годах прошлого века в России И.В. Сергеева разрабатывала вихретокопелловый контроль металлов [3].

В настоящей статье подводится итог предварительным исследованиям в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в области вышеуказанных методов.

**УЗ-стимуляция.** В 1990-х гг. была разработана вибротермография как метод визуализации температурных полей в объектах, подвергаемых периодическому механическому нагружению; при этом могут быть использованы как звуковые, так и УЗ, волны для возбуждения внутреннего трения в материале контролируемых изделий.

В настоящее время, в основном, применяют УЗ-стимуляцию, которая реализует принцип «квазиоптимального» нагрева, поскольку температурные сигналы генерируются дефектами, а основной материал остается практически холодным. При этом часто используют принцип синхронного детектирования, что позволяет существенно повысить чувствительность контроля при сохранении относительно невысокой мощности ультразвука. Данный метод разрабатывался рядом исследовательских групп, в частности, Г. Буссе и др. (Германия), которые предложили термин «синхронная УЗ-термография» (ultrasonic lock-in thermography) [4-7], Р. Томасом и др. (США), предпочитавшими термин «звуковое ИК видение» (sonic IR imaging), или «термозвуковой» метод (thermosonics) [8], а также М. Бурке и У. Миллером (США), которые ввели термины «ВиброИК» (VibroIR) и «ЗвукоИК» (SonicIR) [9].

Как при оптическом, так и при индукционном, нагреве температурный сигнал  $\Delta T$ , обусловленный дефектом, возникает на фоне избыточной температуры образца  $T$ , поэтому важным параметром обнаружения является текущий температурный контраст  $C = \Delta T/T$ .



**Рис. 1. Принцип УЗ-, ИК-термографии**

В случае УЗ-стимуляции сигналы  $\Delta T$  возникают только в зонах структурных дефектов, например, трещин (рис. 1), в то время как основной материал сохраняет начальную температуру  $T_a$ . Поэтому избыточная температура объекта контроля остается близкой к нулю и, концепция температурного контраста теряет смысл. Во многих случаях, только дефекты определенного типа и размера способны генерировать тепловую энергию за счет внутреннего трения стенок, поэтому текстура соответствующих ИК термограмм зачастую отражает динамически развивающиеся дефекты, но не выявляет так называемые «стабильные» дефекты с большим раскрытием (в ряде случаев генерация тепла имеет место только в устьях трещин).

*Оценка генерируемой энергии.* Феноменологически, возникновение температурных сигналов в дефектных зонах можно моделировать включением скрытого источника тепла (точечного, линейного или протяженного). Оценка энергии, генерируемой такими источниками, была выполнена путем моделировании трехмерной задачи теплопроводности с помощью программы ThermoSource (ООО «Инновация»). Объектом контроля является многослойный параллелепипед, содержащий до девяти внутренних источников тепла, размеры и мощность тепловыделения которых можно задавать произвольным образом. Расчетные температурные распределения сравнивали с экспериментальными (см. ниже) данными, полученными на образце из углепластика с трещинами, произведенными ударным способом (энергия удара металлическим шариком массой 260 г составила 2 Дж). При этом на поверхности композита видимые следы ударного повреждения отсутствовали, но УЗ-стимуляция образца выявило наличие нескольких длинных трещин, распространявшихся вдоль углеродных волокон (рис. 2, а). Моделирование осуществляли таким образом, чтобы расчетная термограмма совпадала с экспериментальной как по амплитуде, так и по текстуре температурного поля (рис. 2, б). В частности, было установлено, что трещина размером  $10 \times 3 \times 0,1$  мм эквивалентна источнику тепла мощностью около 160 мВт при электрической мощности на магнитострикторе 100 Вт. Стоит заметить, что мощность поглощенной собственно УЗ-энергии в экспериментах не определялась ввиду отсутствия соответствующей методики.

*Экспериментальное оборудование.* В экспериментах использовали установку, схема которой приведена на рис. 3. Термограммы записывали с помощью трех ИК тепловизоров: ThermoCam SC65 ( $320 \times 240$ ;  $0,06$  °С; 25 Гц), ТН 9100 ( $320 \times 240$ ;  $0,06$  °С; 60 Гц) и SC7700М

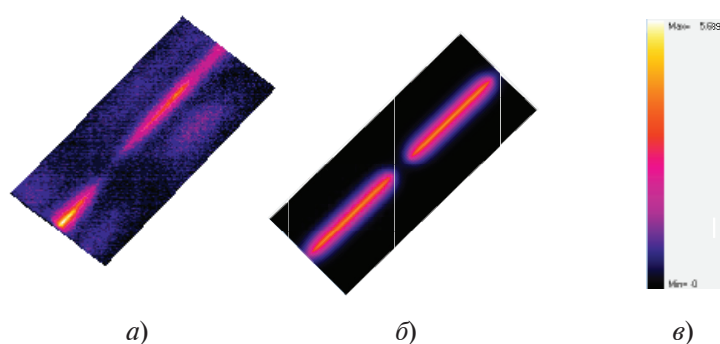


Рис. 2. Сравнение экспериментальной (а) и расчетной (б) ИК-термограмм в зоне ударного повреждения углепластика толщиной 5 мм (непрерывная УЗ стимуляция в течение 5 с)

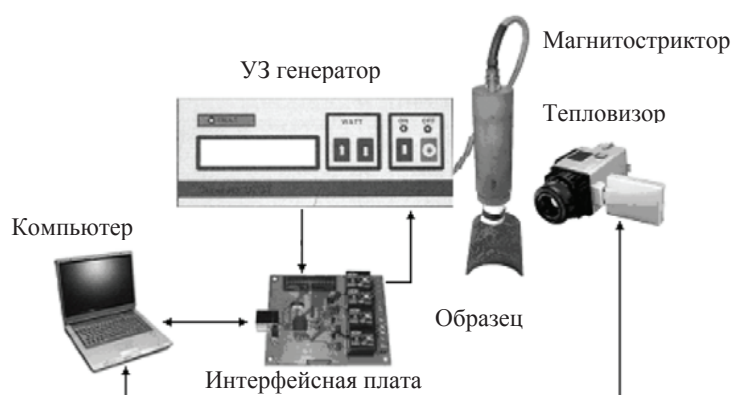
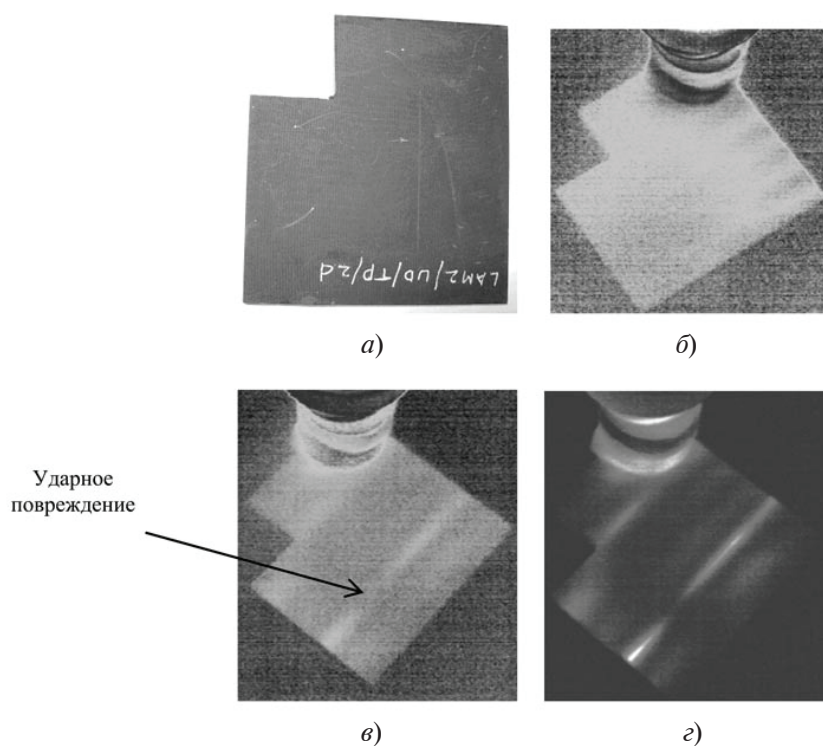


Рис. 3. УЗ-, ИК-термографическая установка

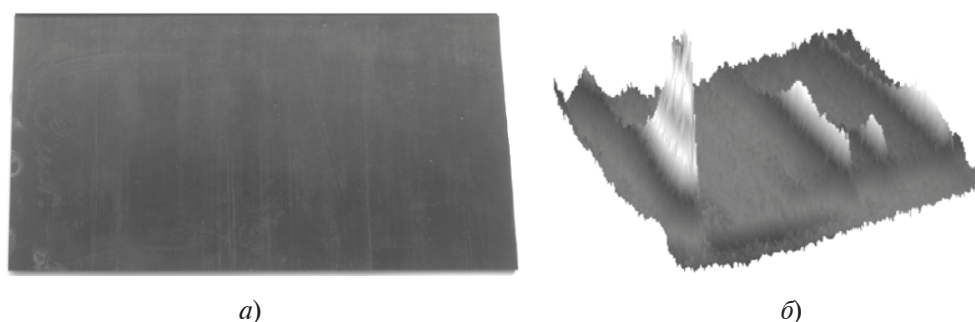
(640×512; 0,025 °С; 115 Гц). Частота записи в большинстве случаев была равна 10 Гц, поэтому выбор оптимального тепловизора не был критичным. УЗ-стимуляцию осуществляли с помощью двух устройств непрерывного и импульсного действия. В последнем случае длительность импульса изменялась от 0,1 до 9999 сек. с шагом 0,1 с. Электрическая мощность непрерывного УЗ-облучения достигала 300 Вт, а импульсного – до 2,5 кВт. Частота ультразвука во всех случаях равнялась 22 кГц, причем в импульсном устройстве была предусмотрена слабая девиация частоты для подавления стоячих волн.

**Результаты.** Данные обнаружения ударных повреждений в углепластике толщиной 5 мм с мононаправленными углеродными волокнами показаны на рис. 4. В бездефектном образце (до его повреждения) было отмечено наличие чередующихся теплых и холодных полос с амплитудой менее 0,5 °С, что говорит о возникновении стоячих волн (рис. 4, б). После повреждения образца с энергией удара 2 Дж в исходной термограмме появился температурный «отпечаток» протяженной трещины с амплитудой температурного сигнала до 2 °С; при этом оптимальное обнаружение трещины обеспечивается применением вейвлет-преобразования (материнская функция Морле, программа ThermoFit Pro, ООО «Инновация») [10].

Другой результат испытаний углепластика после ударного повреждения с энергией удара 6 Дж, что привело к появлению четырех трещин, показано на рис. 5. Все дефекты отчетливо видны в процессе непрерывной УЗ-стимуляции (электрическая мощность 100–200 Вт), производя температурные сигналы амплитудой около 2–3 °С.

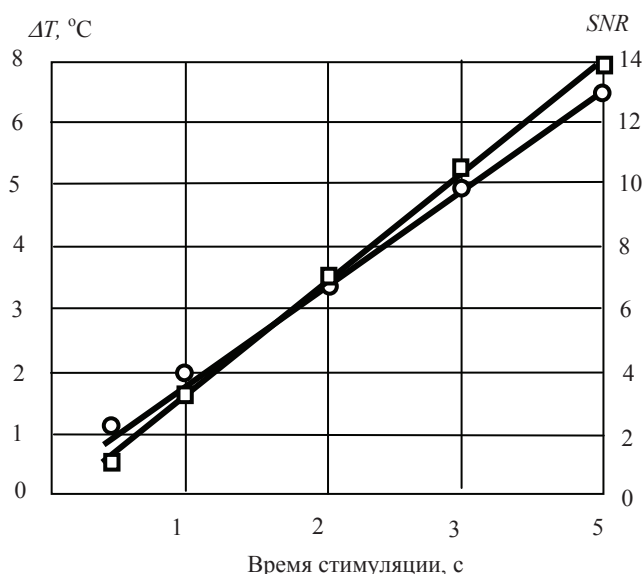


**Рис. 4. Обнаружение ударного повреждения энергией 2 Дж в углепластике:**  
*a* – образец; *б* – ИК-термограмма образца до повреждения; *в* – «оптимальная» исходная термограмма; *г* – после применения вейвлет-преобразования

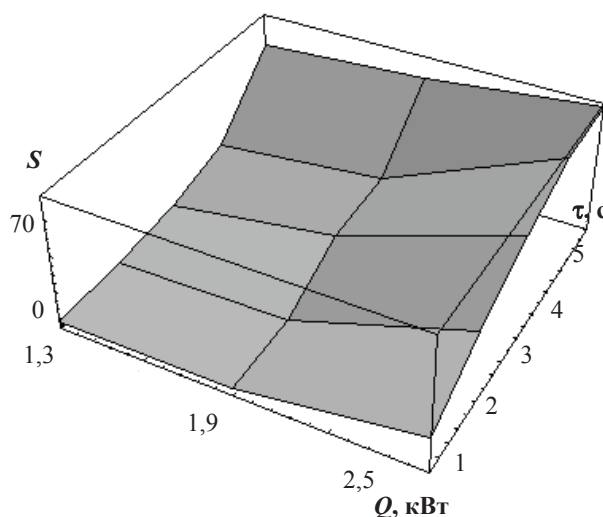


**Рис. 5. Обнаружение ударного повреждения энергией 6 Дж в углепластике:**  
*a* – образец; *б* – распределение температуры

Принимая, что дефект, облучаемый УЗ-волнами, может рассматриваться как источник тепла, логично предположить, что величина  $\Delta T$  должна быть пропорциональна поглощенной энергии. Следовательно, величина  $\Delta T$  должна расти с увеличением времени облучения или электрической мощности на магнитоотрикторе. Это предположение подтверждено данными на рис. 6, где как дифференциальный сигнал  $\Delta T$ , так и отношение сигнал/шум ( $SNR$ ), являются линейной функции времени стимуляции. На рис. 7. приведена зависимость  $SNR$  от электрической мощности и длительности УЗ-стимуляции для углепластика. Величины



**Рис. 6.** Зависимость температурного сигнала  $\Delta T$  и отношения сигнал/шум SNR от длительности стимуляции (образец из органопластика толщиной 4 мм, непрерывная УЗ-стимуляция с электрической мощностью 200 Вт)



**Рис. 7.** Зависимость отношения сигнал/шум  $S$  от мощности  $Q$  и длительности УЗ-стимуляции при выявлении трещин в образце из углепластика толщиной 3 мм

$SNR$  были определены с помощью программы ThermoFit Pro в виде:  $SNR = \Delta T / \sqrt{\Delta \bar{T}^2}$ , где  $\sqrt{\Delta \bar{T}^2}$  – стандартное отклонение (характеристика шума) в выбранной области.

Дополнительные эксперименты показали, что температурные сигналы спадают с увеличением расстояния между точкой стимуляции и дефектом. Для трещин максимальные значения  $\Delta T$  возникают при их перпендикулярном облучении. Также было установлено, что наличие иммерсионных жидкостей различного типа не оказывают существенного влияния на величину  $\Delta T$ , что обусловлено магнитострикционным (ударным) характером возбуждения ультразвука.

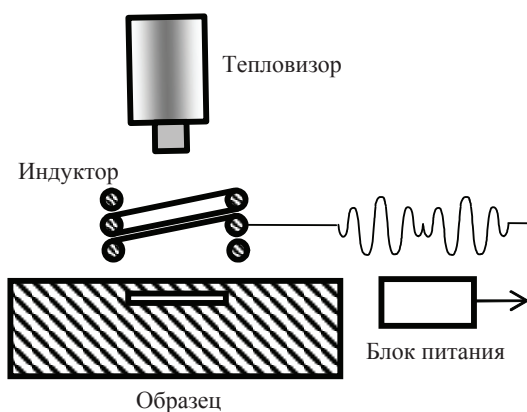


Рис. 8. Принцип индукционной ИК-термографии

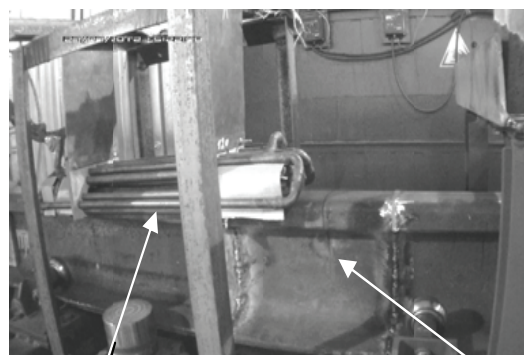


Рис. 9. Индукционный нагрев рельсов

**Индукционная стимуляция.** Согласно схеме на рис. 8, виток индуктора возбуждает кольцевые вихревые токи в электропроводном материале и выделяющееся при этом джоулево тепло распространяется в материале, обуславливая появление температурных аномалий в дефектных зонах.

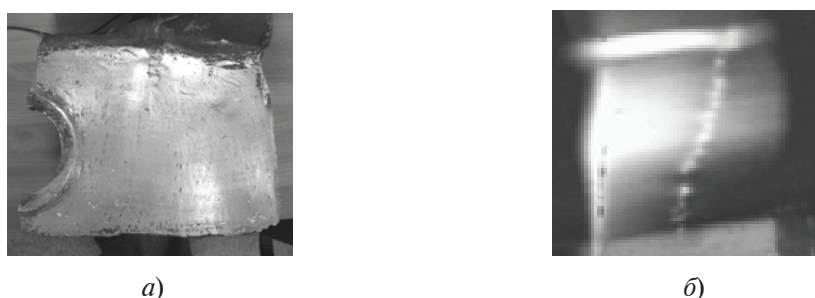
Диапазон глубин обнаруживаемых дефектов зависит от вида материала и частоты. Например, вихревые токи частотой 100 кГц проникают в сталь на глубину 0,07 мм, тогда как в алюминиевых сотах глубина проникновения составит 5 мм, а в углепластике — 50 мм.

Практическое использование индукционной ИК-термографии стало возможным после появления на рынке быстродействующих ИК-тепловизоров с высоким пространственным и температурным разрешением. В 1989 г. Ю. Хартикайнен и др. применили тепловую стимуляцию мощностью до 200 Вт в диапазоне высоких частот от 1 до 30 МГц [11]. Авиационные сотовые панели успешно контролировали с помощью движущегося индуктора [12], тогда как усталостные трещины в отливках лучше всего выявлялись в тех случаях, когда изделие находилось внутри витка индуктора при длительности нагрева 1–2 с. [13, 14]. В настоящее время чаще всего используют диапазон частот 50–200 кГц.

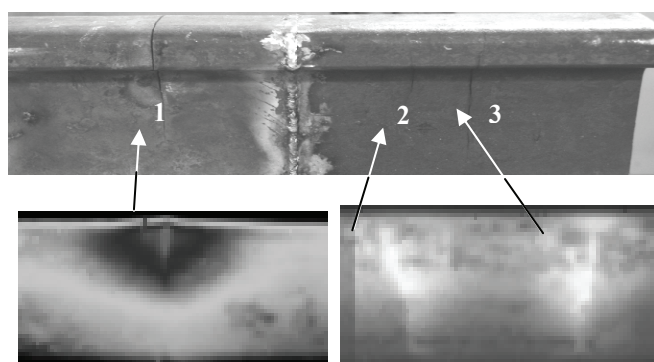
**Экспериментальное оборудование.** Индукционный нагрев осуществляли с помощью двух установок, изначально предназначенных для упрочнения стали. Первая портативная установка возбуждала вихревые токи частотой 40 кГц и мощностью до 10 кВт, причем индуктор был снабжен кабелем длиной 3 м, что позволяло нагревать изделия вручную. Вторая установка (рис. 9) была стационарной и предназначалась для упрочнения рельс (14 кГц, 10 кВт).

**Результаты.** Методом индукционной ИК термографии были проконтролированы две секции железнодорожных вагонных тележек (рис. 10, а) с усталостными трещинами, ранее обнаруженными магнитопорошковым методом. На плоском участке одной из секций было подтверждено наличие трещины длиной 12 см (рис. 10, б), тогда как трещина в зоне изделия со значительным радиусом кривизны не обнаруживалась из-за неэффективного нагрева плоским индуктором. В данном эксперименте виток индуктора перемещали вручную со скоростью около 3 см/с, термограммы записывали с частотой 10 Гц, а их обработку производили методом анализа главных компонент [15].

Следующий эксперимент проводили на секции железнодорожной рельсы длиной 1 м, содержащей в верхней части один искусственный дефект в виде пропила и две естественные усталостные трещины (рис. 11). Наилучшие результаты были получены при скорости 35 мм/с, максимально достижимой в эксперименте. Избыточная температура



**Рис. 10. Индукционный ИК-термографический контроль железнодорожных вагонных тележек:**  
а – объект контроля; б – «ИК-термограмма» после применения метода анализа главных компонент



**Рис. 11. Индукционный ИК-термографический контроль железнодорожных рельсов:**  
1 – пропилен; 2 и 3 – усталостные трещины

рельсы составляла от 15 до 35 °С, на фоне чего уверенно обнаруживались все три дефекта с амплитудой дифференциальных сигналов до 14 °С над пропилом и до 11 °С над трещинами.

При снижении скорости перемещения рельсы до 20 мм/с избыточная температура возрастала пропорционально квадратному корню из отношения скоростей, но величина  $\Delta T$  снижалась на 20–30 %, по-видимому, вследствие усиления диффузии тепла вокруг дефектов.

**Заключение.** Сравнительно недавно предложенные методы ультразвуковой и индукционной инфракрасной термографии позволяют преодолеть ряд недостатков, присущих оптической стимуляции дефектов при тепловом контроле. Ультразвуковая стимуляция не изменяет температуру основного материала, в то время как структурные дефекты генерируют тепловую энергию благодаря эффектам внутреннего трения и механического гистерезиса. Данный метод неразрушающих испытаний носит многопараметрический характер и сравнительно малоисследован. В свою очередь, индукционная стимуляция является весьма эффективной при обнаружении усталостных трещин в металлах независимо от их ориентации, несмотря на то, что при этом существенно нагревается и основной материал.

Настоящие исследования поддержаны государственным контрактом № 11.519.11.6015, выполняемым в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.».

**Список литературы**

1. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2009.
2. **Green D.R.** Principles and applications of emittance-independent infrared nondestructive testing, *Appl. Optics*, 1968, Vol. 7, № 9.
3. **Сергеева И.В.** Исследование вихретокового метода и создание импульсного толщиномера. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ВЗМИ, 1987.
4. **Dillenz A., Zweschper Th., Busse G.** Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features, *Insight*, December 2000, Vol. 42, № 12.
5. **Zweschper Th., Dillenz A., Busse G.** Ultrasound lock-in thermography – a defect selective method for the inspection of aerospace components, *Insight*, March 2001, Vol. 43, № 3.
6. **Zweschper Th., Dillenz A., Busse G.** Ultrasound lockin thermography – an NDT method for the inspection of aerospace structures, *Proc. Eurotherm Seminar № 64 «Quant. IR Thermography»*, Reims, France, July 18-21, 2000.
7. **Dillenz A., Zweschper Th., Busse G.** Phase angle thermography with ultrasound burst excitation, *Proc. Eurotherm Seminar № 64 «Quant. IR Thermography»*, Reims, France, July 18–21, 2000.
8. **Favro L.D., Han X., Ouyang Z. et al.** IR Imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse, *Proc. SPIE «Thermosense-XXII»*, 2000, Vol. 4020.
9. **Burke M.W., Miller W.O.** Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory, *Proc. SPIE «Thermosense-XXVI»*, 2004, Vol. 5405.
10. **Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С.** Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // *Дефектоскопия*. 2011. № 4.
11. **Hartikainen J., Lehtiniemi R., Luukkala M.** Fast photothermal measurement system utilizing CO<sub>2</sub> laser and RF induction heating, *Rev. Progress in Quant. NDE*, ed. D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1991, Vol. 10A.
12. **McCullough R.W.** Transient thermographic technique for NDI of aerospace composite structures, *Proc. SPIE «Thermosense-XXVI»*. 2004, Vol. 5405.
13. **Oswald-Tranta B., Sorger M.** Automatic defect classification in inductive thermographical testing, *Proc. QIRT'2010 Conference*, 2010.
14. **Oswald-Tranta B., Sorger M., O'Leary P.** Thermographic crack detection and failure classification, *Journal of Electronic Imaging*, July-Sept. 2010, Vol. 19(3).
15. **Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Свицерский В.** Применение метода анализа главных компонент для обработки данных динамического теплового контроля // *Дефектоскопия*. 2008. № 7.