

Измерение углов между полированными гранями призматических мер плоского угла (далее – мер) осуществляется в двух режимах измерения: с помощью одного автоколлиматора ELCOMAT HR (измерение мер типов 1, 2, 3 и 4) и с помощью двух автоколлиматоров ELCOMAT HR (измерение мер типа 4).

Сменный предметный стол устанавливается и базируется на прецизионном поворотном столе Rotary Table RT-300.

Измеряемая мера устанавливается на сменный предметный стол в поле зрения автоколлиматоров таким образом, чтобы нормаль к отражающей поверхности меры была совмещена с осью выходного излучения одного из автоколлиматоров. Операции по установке измеряемых мер на сменном предметном столе для всех режимов измерения одинаковы.

Измерение углов меры с помощью одного автоколлиматора ELCOMAT HR и прецизионного поворотного стола Rotary Table RT-300 осуществляется в автоматическом режиме по программам

FlatAngel и FAMProtocols. После установки базовых настроек, прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300 поворачивается на заданные углы по и против часовой стрелки  $N$  раз, где  $N$  – количество приемов измерения, результаты измерений заносятся в протокол автоматически.

Для измерения углов меры с помощью двух автоколлиматоров ELCOMAT HR измеряемую меру устанавливают на сменный предметный стол, первый автоколлиматор направляют на грань  $m$ , а второй – на  $n$ . После установки базовых настроек в программе FlatAngel, прецизионный поворотный стол Rotary Table RT-300 поворачивается на заданные углы по или против часовой стрелки (в зависимости от выбора направления измерения)  $N$  раз, где  $N$  – количество приемов измерения, результаты измерений заносятся в протокол автоматически.

Для обработки результатов измерений используют ПО эталона (программы FlatAngel и FAMProtocols).

УДК 311.2

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ИНФОРМАТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Галаган Р.М., Момот А.С.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

Тепловой неразрушающий контроль (НК) получил широкое распространение во многих областях промышленности, в основном благодаря своей бесконтактности и скорости проведения. Однако однозначная интерпретация результатов активного теплового контроля зачастую бывает затруднена из-за высокого уровня шумов и помех. Тепловые отпечатки дефектов не всегда несут достоверную информацию об их размерах, форме и точном местоположении. Кроме того, анализируя лишь один информативный параметр – температуру – невозможно определить такие параметры дефектов, как глубина залегания или толщина (раскрытие). Известно также, что гистограммы распределения температур в дефектных и бездефектных участках частично перекрывают друг друга, что снижает надёжность принятия решения [1]. В связи с этим, актуальной задачей является введение дополнительных информативных параметров с целью повышения достоверности контроля.

В активном тепловом контроле одним из важных дополнительных информативных параметров является оптимальное время обнаружения  $\tau_{opt}$ . Это момент времени, при котором дифференциальный температурный сигнал между дефектными и бездефектными областями становится максимальным. Для определения  $\tau_{opt}$  и максимального

значения температурного сигнала  $\Delta T_{max}$  удобно использовать тепловые профили – графики изменения дифференциального температурного сигнала во времени в определённых точках объекта контроля. Известен метод динамической тепловой томографии (ДТТ), основанный на зависимости значения  $\tau_{opt}$  от глубины залегания дефектов [2]. Величина  $\Delta T_{max}$  существенно зависит от размеров дефектов. Однако для подповерхностных дефектов эти зависимости не наблюдаются.

В общем случае, дефектная и бездефектная области могут иметь схожие распределения температур, что усложняет интерпретацию результатов контроля. В то же время, данные области могут перекрываться по одному параметру, но существенно различаться по другому параметру. Например, увеличение глубины залегания дефектов  $l$  приводит к увеличению оптимального времени контроля  $\tau_{opt}$ , что позволяет отделить внутренние дефекты от поверхностных шумов. Ещё одним информативным параметром может служить геометрический размер дефекта  $h$ , анализируя который можно разделить сигналы от внутренних царапин и небольших трещин и внутренние дефекты значительного объёма и площади. Таким образом, можно перейти к многомерному пространству диагностических признаков, что позволит оце-

нить степень различия соответствующих статистических распределений более достоверно.

Важным условием при выборе дополнительных информативных параметров является их слабая взаимосвязь. На данный момент практически не проводилось исследований в направлении статистической оценки степени корреляции различных информативных параметров активного теплового контроля. Соответственно, отсутствуют регрессионные модели, описывающие характер связи определенного информативного параметра с конкретной характеристикой дефекта, например, размером или глубиной залегания. Статистическая оценка результатов теплового контроля позволит определить либо разработать методы, позволяющие решать задачи тепловой дефектометрии и томографии, относящиеся к классу обратных задач НК.

Для проведения статистического анализа взаимосвязей между оптимальным временем контроля  $\tau_{opt}$ , максимальным значением дифференциального температурного сигнала  $\Delta T_{max}$ , глубиной залегания дефектов  $l$  и размером дефектов  $h$  было проведено компьютерное моделирование активного теплового контроля алюминиевой пластины толщиной 10 мм. Модель пластины содержит внутренние искусственные дефекты различных размеров и залегающие на разных глубинах. Компьютерное моделирование проводилось в программе COMSOL Multiphysics. Пластина нагревалась тепловым потоком мощностью 10 кВт на протяжении 0,3 с. Всего записана последовательность из 50 термограмм. Обработка и оценка результатов моделирования проводилась в программном пакете MATLAB.

Из множества результатов были сделаны выборки объемом по 15 элементов. Полученные результаты измерений распределены по нормальному закону. Была проведена оценка степени корреляции между информативными параметрами и характеристиками дефектов. Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  и построены корреляционно-регрессионные модели, определяющие вид установленных взаимосвязей. Также проведен дисперсионный анализ полученных результатов. Исследовалась степень влияния  $\eta$  глубины залегания и размера дефектов на  $\tau_{opt}$  и  $\Delta T_{max}$ . Результаты статистического анализа сведены в таблицу 1.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод про наличие выраженных взаимосвязей и сильного взаимного влияния между всеми рассмотренными факторами. Характер связей преимущественно нелинейный, линейная связь наблюдается только между информативными параметрами и геометрическим размером дефектов. Такие результаты демонстрируют сложность однозначной интерпретации данных теплового кон-

троля. Присутствие уверенной корреляции между рассмотренными параметрами затрудняет их использование для решения задач тепловой дефектометрии с высокой достоверностью. Однако, оптимальное время наблюдения сильно зависит от глубины залегания дефектов и в меньшей степени от размера дефектов. В то же время, максимальное значение температурного сигнала в меньшей степени зависит от глубины залегания дефектов. Эту зависимость можно учитывать при построении тепловых томограмм.

Таблица 1. Результаты статистического анализа данных теплового контроля

Параметр	$\tau_{opt}$	$\Delta T_{max}$
Глубина залегания $l$	$r = 0,963$ $\eta = 91,89\%$ связь: показательная	$r = -0,793$ $\eta = 99,23\%$ связь: показательная
Размер дефекта $h$	$r = 0,544$ $\eta = 32,05\%$ связь: линейная	$r = 0,998$ $\eta = 96,29\%$ связь: линейная
$\tau_{opt}$		$r = -0,564$ связь: гиперболическая

Наиболее выраженной можно считать линейную зависимость  $\Delta T_{max}$  от размера дефектов. Данный факт можно использовать при сравнении толщины дефектов, имеющих одинаковую глубину залегания и площадь теплового отпечатка. При этом получение количественной оценки параметров дефекта остаётся затруднительным.

Результаты статистического анализа подтверждают необходимость поиска новых информативных параметров теплового контроля. Это могут быть фазовые или мощностные характеристики температурного сигнала, получаемые в результате применения преобразования Фурье. Такой подход уже используется в методе импульсной фазовой томографии, однако требует дальнейшего изучения [3].

Перспективность многопараметрического подхода к интерпретации результатов теплового контроля осложняется значительным уровнем шумов, которые в особенности присутствуют в многослойных объектах. Даже незначительная неравномерность нагрева может существенно повлиять на достоверность полученных результатов. Учитывая наличие взаимосвязей сложного характера между всеми информативными параметрами теплового НК, на практике традиционный статистический анализ данных является малоэффективным. Например, во многих случаях построение разделяющей гиперплоскости в многомерном пространстве признаков является затруднительным в связи с описанными выше причинами.

Описанные закономерности приводят к необходимости поиска новых методов обработки данных теплового контроля. Перспективным статистическим методом выглядит метод анализа главных компонент, позволяющий значительно снизить размерность исходных данных и повысить соотношение сигнал/шум на термограммах путём исключения из рассмотрения взаимосвязанных и малоинформативных параметров. Большой интерес также представляет изучение возможностей применения искусственных нейронных сетей для обработки термограмм.

УДК 620.1.05(045)(476)

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ В БЕЛАРУСИ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ Найдёнова В.И., Василевич О.В.

*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

В настоящее время в промышленно развитых странах наиболее эффективным инструментом оценки уровня качества измерений и испытаний признана проверка квалификации (proficiency testing). Под проверкой квалификации понимают оценивание деятельности участника по предварительно установленным критериям посредством межлабораторных сличений.

Деятельность по организации и проведению проверок квалификации выполняется провайдерами программ ПК и является международно-признанной практикой и определена международным стандартом ISO/IEC 17043:2010.

Белорусский государственный институт метрологии оказывает услуги по организации межлабораторных сличений с 1993 года, практически с начала создания Национальной системы аккредитации Республики Беларусь. В это время БелГИМ являлся уполномоченным органом по аккредитации лабораторий.

В 2000 году были разработаны национальные стандарты, основанные на международных руководствах ИСО/МЭК 43.

В период с 2000 по 2007 годы в стране сформировалась сеть органов по аккредитации (наравне с БелГИМ органами по аккредитации лабораторий были назначены 6 центров стандартизации, метрологии и сертификации), которые наряду с оценкой лабораторий осуществляли деятельность по межлабораторным сличениям.

В 2010 году создана рабочая группа по межлабораторным сличениям НТК Метр Межгосударственного Совета по стандартизации СНГ.

В 2011 году, в связи с созданием в Республике Беларусь единого органа по аккредитации – Белорусского государственного центра аккредитации, деятельность по аккредитации была откреплена от БелГИМ и центров

## Литература

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М. : ИД Спектр, 2013. – 544 с.
2. Maldague X., Galmiche F. Advances in pulsed phase thermography // *Infrared Physics & Technology*. – 2002. – Vol. 43. – pp. 175–181.
3. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В. Применение Фурье-анализа и метода анализа главных компонент для обработки данных динамического теплового контроля // *Известия ТПУ*. – 2008. – № 2. – С. 279–285.

стандартизации, метрологии и сертификации. Однако эти организации продолжили деятельность по проведению программ проверок квалификации лабораторий. В 2011 году БелГИМ официально назначен Госстандартом Республики Беларусь провайдером проверки квалификации поверочных, калибровочных и испытательных лабораторий.

В 2013 году БелГИМ совместно с Уральским научно-исследовательским институтом метрологии разработал межгосударственный стандарт ГОСТ ISO/IEC 17043-2013, степень гармонизации которого с международным стандартом – IDT. Таким образом, деятельность по проведению проверок квалификации на пространстве СНГ и ЕАЭС осуществляется в соответствии с международными требованиями.

На этапе развития деятельности по проверке квалификации в период с 2012 по 2017 годы в Республике Беларусь, как и в ряде стран ЕАЭС и СНГ, Госстандартом Республики Беларусь было принято решение поручить выполнение работ организациям государственной метрологической службы (ГМС), как наиболее оснащенным в техническом плане и подготовленным в практических вопросах выполнения отдельных видов измерений и испытаний, и профильным компетентным организациям. Таким образом, в этот период в стране сформировалась сеть компетентных провайдеров проверки квалификации, декларирующих соответствие своей деятельности требованиям ISO/IEC 17043.

С целью обеспечения и организации деятельности по проверкам квалификации, с учетом Протокола о признании результатов работ по аккредитации органов по оценке соответствия, Протокола о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений и на основании Решения Коллегии ЕЭК от 26.01.2016 № 12, приказом