

УДК 620.192.63

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТА ПРИ АКТИВНОМ ТЕПЛОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ  
(INFLUENCE OF THICKNESS OF THE PRODUCT ON DETERMINATION OF DEPTH OF DEFECT AT ACTIVE THERMAL NONDESTRUCTIVE CONTROL)**

А. А. Разумова, В. В. Ширяев  
A. A. Razumova, V.V. Shiryaev

Томский политехнический университет  
Razumova\_aa@mail.ru

В данной работе представлены результаты опыта по определению влияния толщины изделия на определение глубины дефекта при активном тепловом контроле. Были получены термограммы и графики, на которых наглядно представлен эксперимент. Теоретическое исследование было проведено в программе ThermCalc2D, а экспериментальные данные были обработаны в программе ThermFit Pro. (In this work results of experiment by definition of influence of thickness of a product on determination of depth of defect at active thermal control are presented. Thermograms and schedules on which experiment is visually presented were received. Theoretical research was carried out in the ThermCalc2D program, and experimental data were processed in the ThermFit Pro program.)

**Ключевые слова:**

Тепловая дефектоскопия, активный тепловой метод неразрушающего контроля, инфракрасная термография, термограмма, температурный сигнал, дефект.  
(Thermal inspection, active thermal method of nondestructive control, infrared thermography, thermogram, temperature signal, defect)

**Введение**

Дефектоскопия - это область знаний, охватывающая теорию, методы и технические средства определения дефектов в материале контролируемых объектов, в частности в материале деталей машин и элементов металлоконструкций. [1] Средства неразрушающего контроля предназначены для обнаружения дефектов типа несплошности материала, оценки физико-химических свойств материала и измерения геометрических параметров деталей. [2]

Согласно ГОСТ 18353 [3] методы неразрушающего контроля классифицируют по следующим видам: акустические, магнитные, проникающими веществами, оптические, радиоволновые, радиационные, электрические, электромагнитные, а также тепловые методы.

Тепловые методы контроля подразделяются на активные и пассивные.

Активный метод теплового неразрушающего контроля (АТНК) применяется, когда объект контроля во время эксплуатации не выделяет тепловое излучение, которого было бы достаточно для проведения теплового контроля. Проводя диагностику данным методом, производят нагрев/охлаждение объекта, передачу его тепловой энергии специальными внешними источниками тепла для создания тепловых потоков внутри изделия. При АТНК используют следующие приборы: измерители тепло- и теплопроводности, тепловизоры, контактные термометры, а также различного вида устройства нагрева или охлаждения. [4] АТНК обычно контролируют такие объекты, как многослойные композитные материалы, объекты искусства и другие объекты. Также этот метод находит применение и в авиакосмической индустрии, инфракрасной влагометрии, энергетике, микроэлектронике, машиностроении, нефтехимии, строительстве и др.

Пассивный метод теплового контроля проводится без воздействия на объект извне, тепловое поле в объекте контроля возникает при его эксплуатации или изготовлении. Преимуществом этого метода является контроль изделия без его вывода из эксплуатации или без дополнительного нагревания объекта. Приборами, с помощью которых можно провести пассивный тепловой контроль, являются тепловизоры, пирометры, инфракрасные термометры, логгеры данных температуры, измерители тепловых потоков. Данный метод является наиболее

распространенным методом теплового контроля и имеет достаточно широкое применение в различных областях, например, машиностроении, энергетике, нефтехимии, строительстве, медицине, металлургии, транспорте. [4]

Тепловая дефектоскопия основана на зависимости температуры поверхности тела во времени от неоднородности структуры тела, наличия дефектов. Благодаря температурному фактору тепловую дефектоскопию можно применять для контроля качества изделий, температура которых во время работы изменяется. [5] Данный метод контроля осуществляются сканированием поверхности (то есть регистрацией ИК излучения поверхности ОК в одном направлении). Приёмниками излучения обычно являются не охлаждаемые болометры, пироэлектрики, охлаждаемые фотоприемники. Чувствительность современной аппаратуры (тепловизоры) позволяет зарегистрировать разность температур на поверхности контролируемой детали менее 0,05°C. [2]

Следует заметить, что высокая чувствительность аппаратуры для регистрации тепловых полей, таких, как тепловизоры, пирометры и др. не имеет особого значения в производственных условиях, так как уровни тепловых шумов, вызванных изменением условий теплообмена с окружающей средой, неравномерностью коэффициента излучения поверхностей объектов контроля, степенью загрязнённости этих же поверхностей имеют величины в пределах 0,3 – 0,6 °C. [6]

### Теоретический раздел

Для проведения теоретических расчетов в качестве программного обеспечения были использованы программа ThermoCalc2D.

Теоретическая модель исследования – цилиндр, которая исследуется программой ThermoCalc2D, показана на рисунке 1:

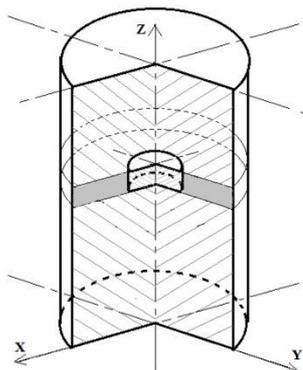


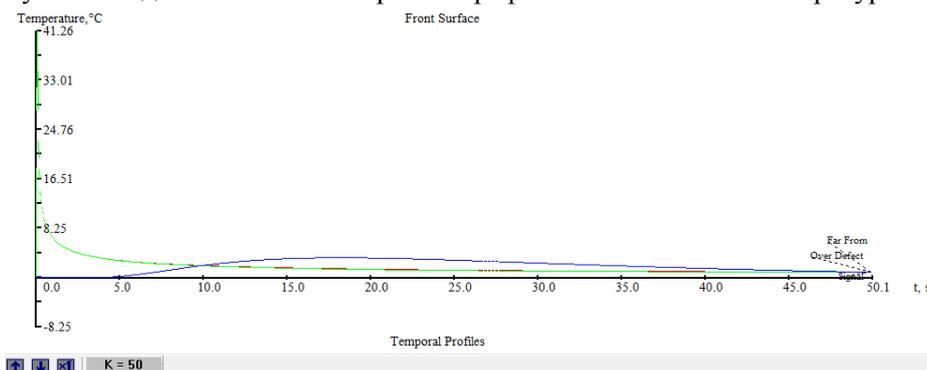
Рис. 1. Теоретическая модель исследования

С помощью программы ThermoCalc2D были рассчитаны следующие данные для стеклопластика (GFRP), из которого был изготовлен объект контроля, которые записаны в Таблице 1:

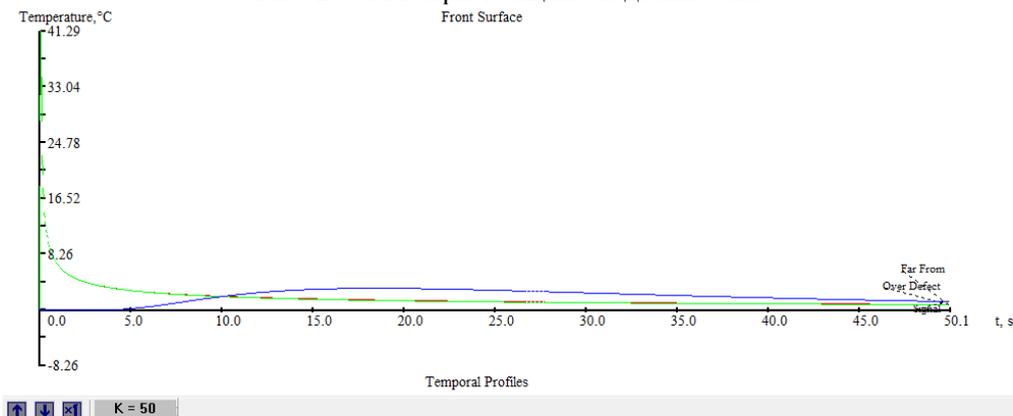
Таблица 1. «Характеристики температурного сигнала»

Толщина ОК d в указанных точках Ti (см. рис.5), мм	L=4, T1	L=6, T2	L=8, T3
Температурный сигнал dT, °C	0,067	0,065	0,056
Время появления максимума температуры сигнала t, с	18,225	18,525	18,699

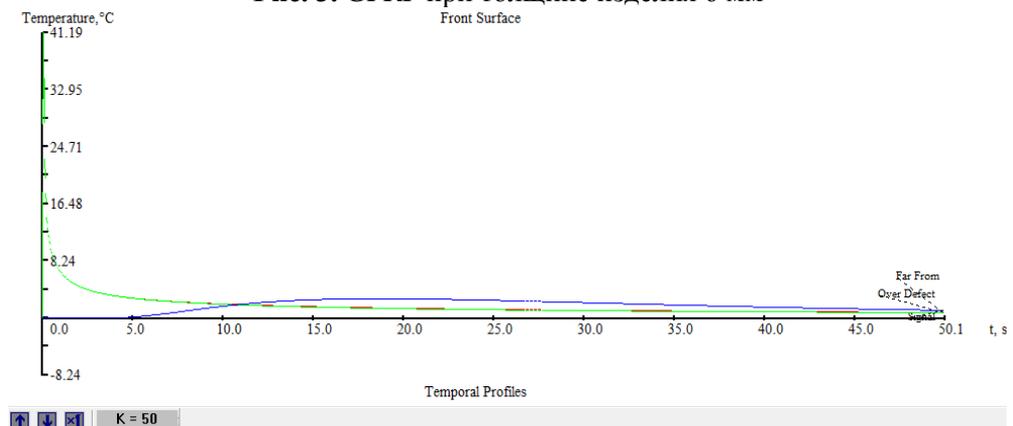
По полученным данным были построены графики зависимости температуры от времени:



**Рис. 2.** GFRP при толщине изделия 4 мм



**Рис. 3.** GFRP при толщине изделия 6 мм



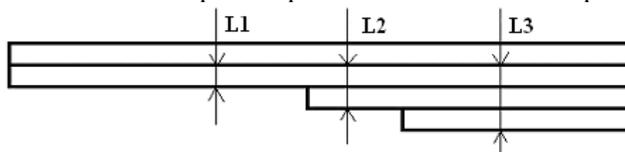
**Рис. 4.** GFRP при толщине изделия 8 мм

Данные графики показывают, что при таких толщинах объекта контроля (ОК) и геометрии дефекта в данном материале дефект сложно обнаружить, следовательно, толщина под дефектом практически не влияет. Кривая синего цвета на графиках показана в увеличенном масштабе, коэффициент увеличения 50.

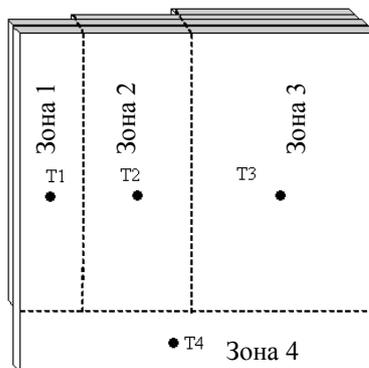
Так же проведены аналогичные расчеты для углепластика и резины.

Для проведения расчетов были взяты параметры образца из стеклопластика, изготовленного для проведения экспериментальных исследований (см. рис 8).

На рисунке 5 показан объект контроля и размещение точек измерения температур.



а)



б)

**Рис. 5.** Объект контроля а) Профиль ОК, б) Размещение точек измерения температур

**Таблица 2.** «Значения температуры в бездефектной области ОК»

	T1', °C,	T2', °C,	T3', °C,	T4', °C,
Стеклопластик	41,37	41,29	41,19	41,41

**Таблица 3.** «Значения температуры в дефектной области ОК»

	T1, °C,	T2, °C,	T3, °C,	T4, °C,
Стеклопластик	41,26	41,29	41,19	41,41

**Таблица 4.** «Контраст ОК»

	C <sub>0</sub> (T1)	C <sub>0</sub> (T2)	C <sub>0</sub> (T3)
Стеклопластик	0,0036	0,0029	0,0053

Расчет контраста проводился по следующей формуле:

$$C_0 = \frac{T4 - T_i}{T4}$$

**Таблица 5.** «Контраст ОК относительно добавления толщины»

	C <sub>0'</sub> (T1)	C <sub>0'</sub> (T2)	C <sub>0'</sub> (T3)
Стеклопластик	0,00097	0,0029	0,0053

Расчет контраста проводился по следующей формуле:

$$C_0' = \frac{T4 - T_i'}{T4}$$

**Таблица 6.** «Контраст ОК – влияние толщины материала под дефектом»

	C' (T1)	C' (T2)	C' (T3)
Стеклопластик	0,0027	0	0

Расчет контраста проводился по следующей формуле:

$$C' = \frac{T_i' - T_i}{T_i'}$$

**Таблица 7.** «Зависимость температурного сигнала от толщины материала под дефектом»

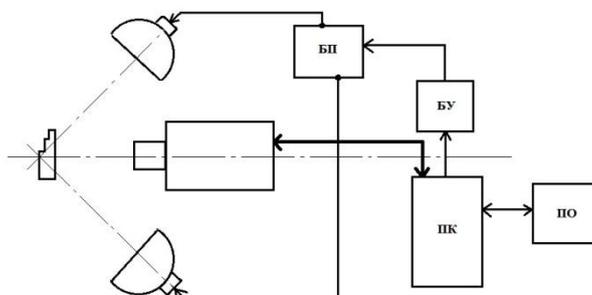
	T1, °C; L1 = 2 мм	T2, °C; L2 = 4 мм	T3, °C; L3 = 6 мм
Стеклопластик	0,067	0,065	0,056
Углепластик	0,289	0,281	0,259
Резина	0,114	0,109	0,1003

Из данных таблицы 6 следует, что влияние температурного сигнала в зависимости от толщины материала проявляется достаточно слабо для приведенных материалов.

Результаты теоретических исследований показывают, что для материалов с низкой теплопроводностью (< 0,1 Вт/м·К, в частности, резина) величины температурных сигналов над дефектом в зависимости от толщины материала под дефектом практически неразличимы. Для материалов с теплопроводностью от 0,1 до 10 Вт/м·К температурный сигнал имеет слабую зависимость от толщины материала под дефектом.

**Эксперимент. Односторонний контроль образца**

Для проведения опыта, чтобы изучить зависимость глубины залегания дефекта от толщины изделия, была собрана экспериментальная установка:



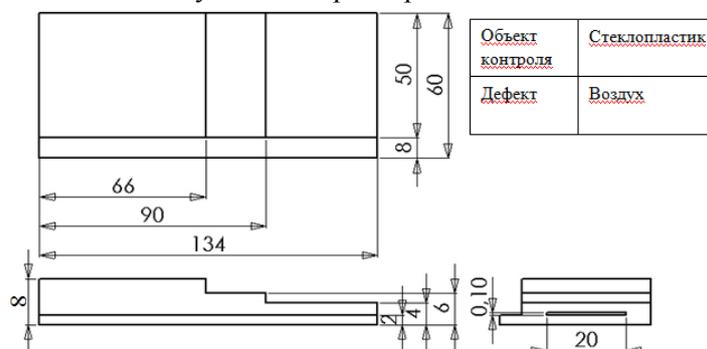
**Рис. 6.** Схема установки,

где БП – блок питания, БУ – блок управления, ПК – персональный компьютер, ПО – программное обеспечение, лампа - вспышка QUA DX и исследуемая модель.



**Рис. 7.** Реальная установка (Вид спереди): 1 – БУ, 2 – ПК, 3 – БП, 4 – экран, 5 – тепловизор, 6 – лампа - вспышка QUA DX, 7 – объект контроля.

На рисунке 8 показан ОК с указанием размеров:

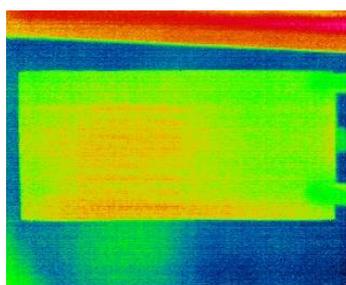


**Рис. 8.** Чертеж детали с указанием размеров

Для записи и обработки термограмм были использованы программа ThermoFit Pro и программа управления цифровым тепловизором NEC.

**Таблица 8.** «Объект контроля с черным покрытием в один слой»

Толщина ОК L в указанных точках $T_i$ (см. рис.5), мм	L=4, T1	L=6, T2	L=8, T3
Температурный сигнал dT, °C	0,09	0,41	-0,04



**Рис. 9.** Термограмма ОК

**Таблица 9.** «Объект контроля с черным покрытием в два слоя»

Толщина ОК L в указанных точках $T_i$ (см. рис.5), мм	L=4, T1	L=6, T2	L=8, T3
Температурный сигнал dT, °C	1,3	1,63	1,45

Термограмма объекта контроля, по которой с помощью программы ThermoFit Pro были определены температурные сигналы:

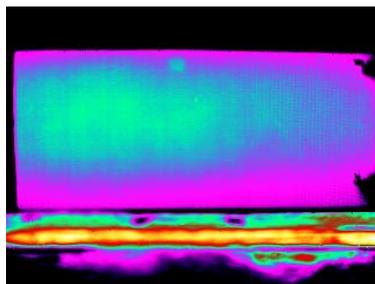


Рис. 10. Термограмма ОК в конце процесса нагрева, термограмма № 3

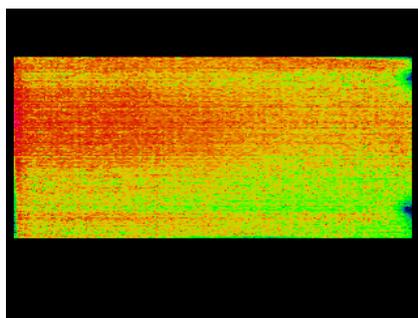


Рис. 11. Распределение температуры по образцу.  
Односторонний контроль, термограмма № 80

Значения температурных сигналов, полученные в эксперименте для данного покрытия различных толщин, показывают, что покрытие в один слой является тонким и прозрачным для оптического излучения лампы-вспышки, что приводит к тому, что поверхность ОК влияет на сигнал. Чтобы устранить это влияние поверхности ОК, необходимо сделать покрытие краской не менее чем в два слоя, однако более толстым слой покрытия делать нежелательно, т.к. он начнет влиять на температурный сигнал.

Так как поверхность ОК имеет неравномерность коэффициента излучения, то необходимо этот коэффициент сделать однородным, то есть покрыть поверхность ОК краской с коэффициентом излучения  $\epsilon = 0,9 - 0,99$ . В данном случае применили чёрную алкидную эмаль с  $\epsilon \approx 0,96$ .

Рассмотрим более подробно изменение температурного сигнала в точках T0-T4. На рисунке 12 представлен график данного изменения.

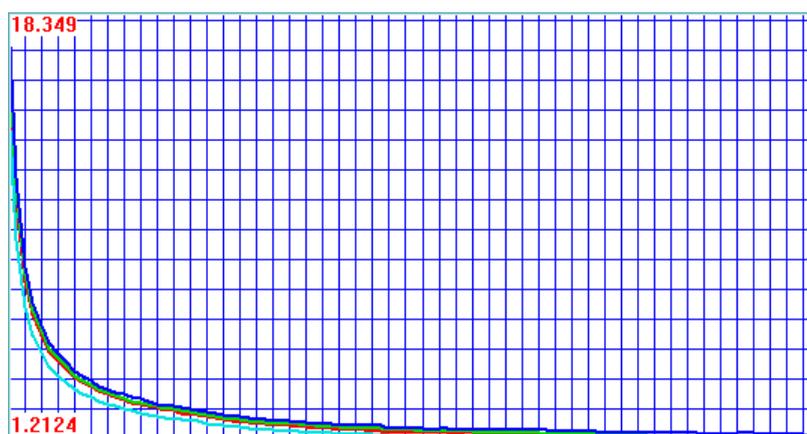
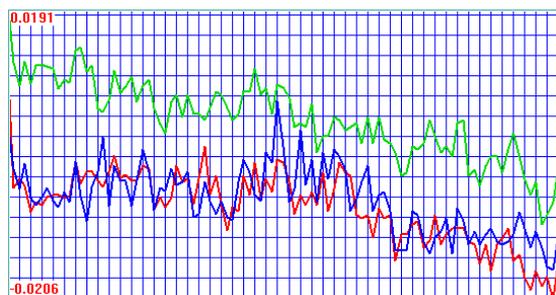


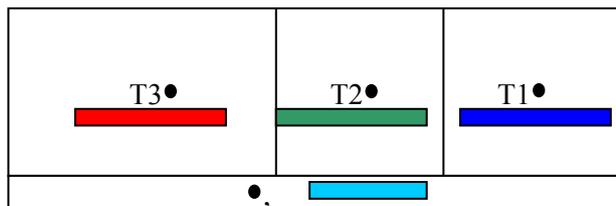
Рис. 12. Изменение температуры в точках T1-T4

Из данного графика видно, что значения температуры в определенных точках отличаются незначительно. Что также показывает, что значение толщины материала за дефектом оказывает лишь слабое влияние на сигнал.

Далее представлен график изменения контраста в точках T0-T4:



**Рис. 13.** Изменение контраста в точках T1-T3



**Рис. 14.** Диаграмма соответствия цветов, выбранных точек и кривых

Данный график показывает, что изменение сигнала и его разброс сравним с уровнем шума. В таблице 10 показаны данные, которые были получены в определенных точках на поверхности (см. рис. 5,6 и 14) объекта контроля.

**Таблица 10.** «Данные в точках T0-T4»

	T0	T1	T2	T3
Температура, °С, 3 кадр	14,83	18,07	16,95	16,45
Температура, °С 80-ый кадр	1,3	1,63	1,45	1,27
Сигнал, °С, 3 кадр		3,24	2,12	1,62
Сигнал, °С, 80-ый кадр		0,33	0,15	-0,03
Контраст (3 кадр)		0,22	0,14	0,12
Контраст (80-ый кадр)		0,25	0,12	-0,02

Расчет контраста проводился по следующей формуле:

$$C = \frac{T_i' - T_i}{T_i'}$$

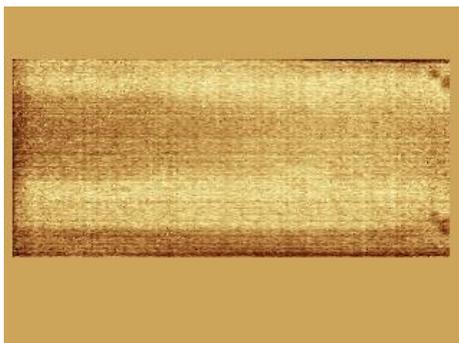
Для сравнения экспериментальная последовательность была обработана различными методами, были определены значения отношения сигнал/шум (SNR) и результаты сведены в таблицу 11, где T0, T1, T2, T3 – выше определенные точки измерения температуры на объекте исследований (см. рис.14).

**Таблица 11.** «Пример применения различных методов обработки термограмм»

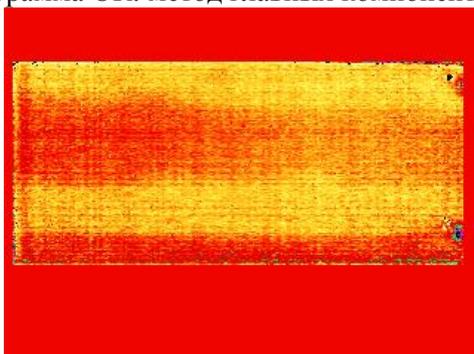
SNR (сигнал/шум)	T1	T2	T3
Последовательность, без обработки, 3-й кадр	18,72	14,96	8,6
Последовательность, без обработки, 80-й кадр	2,81	1,59	0,84
Обработка корреляцией, сравнение со средним значением по кадру, 3-й кадр	0,84	1,33	0,97
Обработка корреляцией, сравнение со значением в T0, 3-й кадр	0,504	0,533	0,755
Метод главных компонент, 1-я компонента	9,1	7,42	4,21
Метод главных компонент, 2-я компонента	1,39	1,1	0,91
Применение вейвлет преобразования с вейвлетом MНat	0,63	1,62	1,51

По данным таблицы 10 можно сделать вывод о том, что формально данные методы не привели к улучшению качества информации, т.к. данные при интересующих температурах различаются не значительно, однако, визуально можно увидеть различия при разных толщинах материала. Так же видно, что SNR по 3-му кадру МГК все же дают информацию, о различии значений в необходимых областях ОК.

Более наглядно можно представить изображение заложенного дефекта в испытуемом образце с помощью программы ThermoFit Pro, позволяющей провести специальную обработку последовательности. Ниже представлены термограммы, которые были получены с помощью применения метода главных компонент и комплексного вейвлет-преобразования (мексиканская шляпа, сдвиг b=5, масштаб a=30 (из 99)):

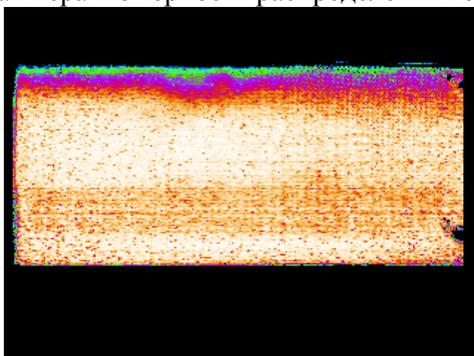


**Рис. 15.** Термограмма ОК: метод главных компонент (2 компонента)



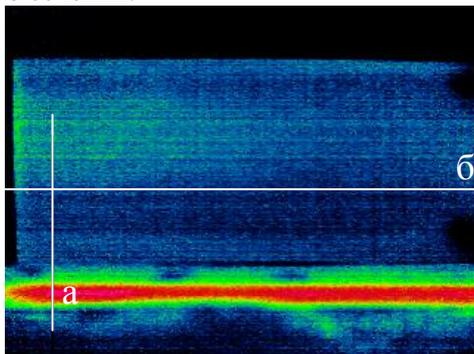
**Рис. 16.** Термограмма ОК: комплексное вейвлет-преобразование (мексиканская шляпа,  $b=5$ ,  $a=30$  (из 99))

С помощью метода корреляции со средней температурой, реализованного в программе ThermoFit Pro, показано качество склейки пластин. Так же этот метод позволяет увидеть четкие границы между дефектом и бездефектной областью ОК. Для исследования выбирались точки из *белой зоны*, где наименьшая неравномерность распределения температуры:

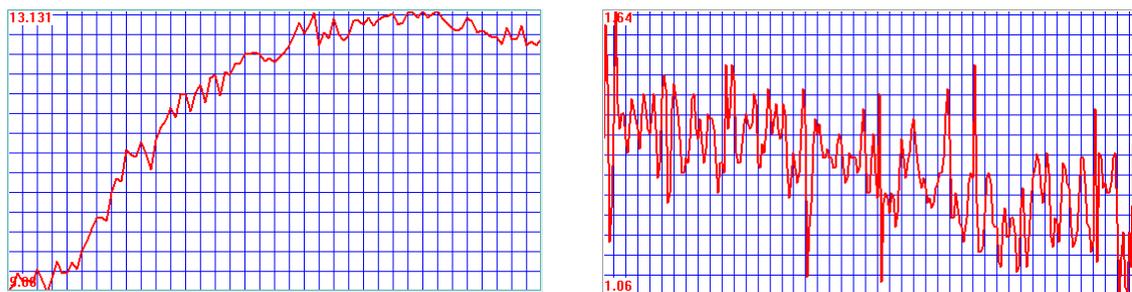


**Рис. 17.** Термограмма ОК с помощью корреляции со средней температурой

С помощью той же программы был построен график распределения температуры по пластине вдоль определенного сечения:



**Рис. 18.** Термограмма ОК



а) б)  
**Рис. 19.** Графики распределения температуры по пластине вдоль сечения а) и б)

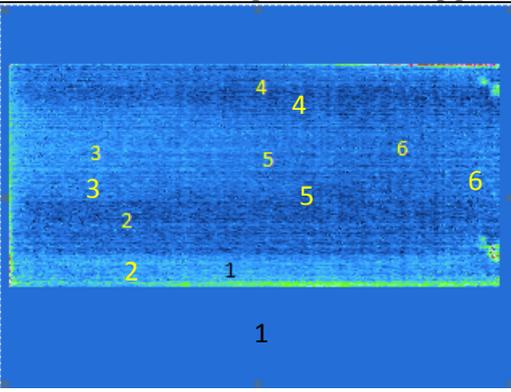
Данные графики показывают распространение шума в сигнале. С помощью черного покрытия влияние шума сведено практически к нулю, что подтверждается отношением сигнал-шум, который равен 2,81 (табл. 10, в точке Т1 для обычного изображения, 80-ый кадр).

**Определение коэффициента температуропроводности данного образца**

Для иллюстрации влияния изменения толщины материала под дефектом в исследуемом образце проведен эксперимент по определению его коэффициента температуропроводности. Нагрев и регистрация производились при одностороннем доступе к образцу. Нагрев производился лампой-вспышкой с энергией 3600 Дж, регистрация – тепловизором NEC со скоростью записи 100 мс на кадр.

Определение коэффициента температуропроводности образца производилось с помощью программы ThermoFit Pro, с использованием алгоритма Заламеда. [7]

**Таблица 11.** «Определение коэффициента температуропроводности»

 <p>Среднее квадратичное отклонение по точкам 3-5-6: <math>\sigma=0,063 \cdot 10^{-7}</math></p> <p>Расчеты показывают, что отклонение коэффициента температуропроводности меньше 1,5%, следовательно, влиянием толщины материала под дефектом можно пренебречь при его определении.</p>	<p>Значения коэффициента температуропроводности</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>№ п/п</th> <th><math>a, \text{ м}^2/\text{с}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><math>1,43 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><math>1,17 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><math>1,56 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><math>1,3 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td><math>1,43 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td><math>1,43 \cdot 10^{-7}</math></td> </tr> </tbody> </table>	№ п/п	$a, \text{ м}^2/\text{с}$	1	$1,43 \cdot 10^{-7}$	2	$1,17 \cdot 10^{-7}$	3	$1,56 \cdot 10^{-7}$	4	$1,3 \cdot 10^{-7}$	5	$1,43 \cdot 10^{-7}$	6	$1,43 \cdot 10^{-7}$
	№ п/п	$a, \text{ м}^2/\text{с}$													
1	$1,43 \cdot 10^{-7}$														
2	$1,17 \cdot 10^{-7}$														
3	$1,56 \cdot 10^{-7}$														
4	$1,3 \cdot 10^{-7}$														
5	$1,43 \cdot 10^{-7}$														
6	$1,43 \cdot 10^{-7}$														
<p>Дисперсия общая: <math>D=0,0015 \cdot 10^{-13}</math></p> <p>Дисперсия по точкам 3-5-6: <math>D=0,0004 \cdot 10^{-13}</math></p>															

**Двусторонний контроль образца**

Рассмотрим двусторонний контроль. С помощью данного метода было получено изображение, на котором четко видны границы участков различной толщины, что показано на рисунке 20.

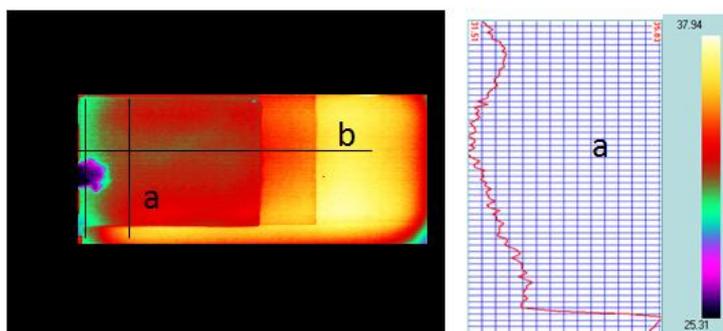


Рис. 20. Двусторонний контроль

Графики распределения температуры по выделенным линиям показывают связь распределения с изменением толщины образца и с наличием дефекта. При двустороннем контроле заметна разница в данных в зависимости от толщины образца и наличия дефекта.

### Заключение

По полученным данным можно сделать следующие выводы о том, что экспериментальные и теоретические данные практически совпадают. Представленные данные несколько различаются по абсолютным значениям, что связано с тем, что неизвестна точная мощность ламп-вспышек и данный параметр в программах ThermoFit Pro и ThermoCalc2D стоит заданным по умолчанию. Данный эксперимент показывает, что изменение толщины ОК за дефектом при данных условиях практически не влияет на результаты. Однако следует иметь в виду, что при измерительных процедурах необходимо знать значение глубины залегания дефекта. Если же глубина залегания дефекта не будет иметь значения, то будет получена обычная дефектограмма. Так же следует отметить, что используя метод главных компонент и комплексного вейвлет-преобразования (мексиканская шляпа) можно получить лишь распределение некоторых величин, но не информацию о глубине залегания дефекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виды и методы дефектоскопии. Классификация. Ультразвуковой, магнитный, вихретоковый, капиллярный методы дефектоскопии // [Электронный ресурс]. – URL: <http://gosnik.postach.io/60-vidy-i-metody-defektoskopii-klassifikatsiia-ultrazvukovoi-magnitnyi-vikhretokovy-i-kapilliarnyi-metody-defektoskopii> (дата обращения 05.01.2015)
2. Юношев М. А. ДЕФЕКТОСКОПИЯ // [Электронный ресурс]. Юношев М. А. Забурненко Е. В. (руководитель). – 2014. – URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/6822.pdf> (дата обращения 05.01.2015)
3. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Взамен ГОСТ 18353-73; введ. 1980-07-01. – СССР.: Межгосударственный стандарт, 2010. – 29 с.
4. TECHNO-NDT // [Электронный ресурс] – URL: <http://t-ndt.ru/index.php?id=28> (дата обращения 10.02.2015)
5. Тепловая дефектоскопия // [Электронный ресурс]. – URL: [http://specural.com/view\\_machine.php?id=6448](http://specural.com/view_machine.php?id=6448) (дата обращения 05.01.2015)
6. Инфракрасная термография и тепловой контроль: научное издание/ Вавилов В. П.; редактор Клейзер В. П. – Москва: ИД Спектр, 2013. – 27, 91-93, 179 с.
7. Joseph N. Zalameda and William P. Winfreeb. Improved Sampling of Thermal Transients using Focal Plane Array Infrared Imagers // Thermosense XXVI, Proc. of SPIE Vol. 5405, pp 374-381

### Сведения об авторах:

**Разумова А. А.:** студент Томского Политехнического университета, сфера научных интересов – активный тепловой неразрушающий контроль.

**Ширяев В. В.:** к.т.н., доцент кафедры Информационно-измерительной техники Томского Политехнического университета, сфера научных интересов – активный тепловой неразрушающий контроль.