

Муслимов А.П., Еренчинов Д.К.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТРЕЩИНЫ  
НА ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

*A.P. Muslimov, D.K. Erenchinov*

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF INFLUENCE OF THE FORM OF A CRACK  
ON CHANGE OF INTENSITY OF RADIATION**

УДК: 681.7.069:620.164.3

*В статье излагаются результаты экспериментальных исследований влияния формы трещины на изменение интенсивности излучения. Установлено, что наибольшее влияние на вид зависимости относительной величины сигнала оказывает высота расположения приемного объектива над поверхностью.*

*In article results of experimental researches of influence of the form of a crack on change of intensity of radiation are stated. It is established that the greatest influence by sight to dependence of relative size of a signal is rendered by height of an arrangement of a reception lens over a surface.*

Для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей влияния формы трещины (угла раскрытия трещины и расположения плоскости симметрии трещины) на изменение интенсивности излучения, отраженного на поверхности использовался источник с равномерным распределением интенсивности излучения круглого сечения. Приемный объектив с круглым сечением устанавливался над исследуемой поверхностью на высоте  $H_1$ , диаметр приемного объектива был равен диаметру источника излучения. Угол падения излучения составлял  $\alpha - 30^\circ$ . Угол  $\alpha_2$  определял расположение плоскости наблюдения относительно исследуемой поверхности и был равен 0, если плоскость наблюдения перпендикулярна направлению распространения зеркально отраженного излучения от бездефектной поверхности. Относительная ширина трещины для всех случаев была равна  $S/D_2=1,15$ . Относительная глубина трещины  $S/H_2$  изменялась в диапазоне  $S/H_2=0,65...1,44$ ,  $S/H_2=0,65$  соответствовала  $\gamma = 18^\circ$ ,  $S/H_2=1,44$  соответствовала  $\gamma=35,8^\circ$  ( $S$  - ширина трещины,  $H_2$  - глубина трещины). Как показывают измерения, при  $\alpha_2 - 0^\circ$  и  $\alpha = \gamma$  относительная величина сигнала не зависела от высоты расположения приемного объектива над поверхностью, и при всех значениях  $H_1$  кривая имела один и тот же вид. Здесь введены обозначения:  $\gamma$  - угол раскрытия трещины,  $\varphi_1$  - угол поворота плоскости симметрии трещины вокруг линии пересечения плоскости симметрии трещины с исходной поверхностью,  $\varphi_2$  - угол наклона плоскости симметрии трещины к плоскости, перпендикулярной данной плоскости. При  $S/D_2>1$  значения относительной величины сигнала  $W/W_2$  не зависели от соотношения ширины трещины и диаметра пятна, вид которой определялся конфигурацией трещины

(значениями углов  $\gamma$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ). При  $S/D_2 < 1$  для той же трещины значения относительной величины сигнала  $W/W_0$  возрастали, при  $S/D_2 \rightarrow 0$ ,  $W/W_0 \rightarrow 1$  для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно (этот вывод вытекает из зависимостей математической модели). Максимальное значение относительной величины сигнала на поверхности трещины при  $\alpha = \gamma$  соответствовало центру трещины ( $x/D_2 = S/2D_2 + 1/2 \cos \alpha$ ) и было равно при четном значении числа переотражений в трещине  $W/W_0 = A^{(n-1)}$ , где  $A$  - коэффициент отражения поверхности трещины,  $n$  - число переотражений в трещине. При нечетных значениях  $n$  и  $n \rightarrow \infty$  ( $n>6$ ,  $S/H_2 < 1$ )  $W/W_0 \rightarrow 0$  для указанного значения  $x/D_2$  при  $S/D_2 > 1$ .

При уменьшении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещался в сторону приемного объектива. Величина максимума и его смещение зависели от угла раскрытия и глубины трещины, а также расстояния от поверхности до приемного объектива.

Заметим, что изменение положения плоскости наблюдений ( $\alpha_2 = 0^\circ$ ) оказывает существенное влияние на форму кривой  $W/W_0$ . Для  $\alpha = \gamma = 30^\circ$  так же, как и при  $\alpha_2=0^\circ$ , сохраняется значение относительной величины сигнала в максимуме и расположение максимума при всех значениях  $\alpha_2 = 0^\circ$ . Значение  $W/W_0$  в точках, соответствующих прохождению центра пятна через края трещины ( $x/D_2 = 0,577$  и  $x/D_2 = 1,73$ ) снижается с ростом  $\alpha_2$ . Для трещин с углами  $\alpha - \gamma$  характерно появление максимумов при  $x/D_2 = 0,8-0,9$ , значение  $W/W_0$  в максимуме возрастает с ростом  $\alpha_2$ , при  $x/D_2 = 1 - 1,6$  наблюдается минимум, значение  $W/W_0$  в этой точке снижается с ростом  $\alpha_2$ . Для  $\gamma = 34^\circ$  максимальное значение  $W/W_0 = 0,67$  при  $x/D_2=0,9$  и  $W/W_0=0$  при  $x/D_2=1,5$  соответствуют  $\alpha_2=75^\circ$ . Для  $\gamma = 27^\circ$  и  $\alpha_2=75^\circ$  максимальное значение  $W/W_0 = 0,85$  при  $x/D_2 = 0,83$ ,  $W/W_0=0$  при  $x/D_2 = 1,04$ .

Проведенные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива  $H_1$  оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой  $W/W_0$ . При  $H_1/D_2 \gg 1$  форма кривой не зависит от значений углов  $\gamma$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и определяется только шириной трещины  $S$  и соотношением ширины трещины и диаметра пятна  $S/D_2$ . Соотношение  $S/D_2$

не оказывает влияния на определение характера трещины при  $S/D_2 > 1$ . При  $S/D_2 < 1$  для той же трещины значения относительной величины сигнала  $W/W_0$  возрастают, при  $S/D_2 \rightarrow 0$   $W/W_0 \rightarrow 1$  для всех точек поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещины невозможно. Поворот плоскости симметрии трещины (изменение величины угла  $\varphi_2$ ) возможно, выявить для неглубоких трещин ( $S/H_2 > 1$ ) при  $\gamma - \frac{\pi - \alpha}{n}$  и  $-5^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$ . При большем угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла  $\varphi_1$  не влияет на форму кривой, так как излучение, переотраженное поверхностью трещины не попадает на приемный объектив. Наклон плоскости симметрии трещины (изменение величины угла  $\varphi_2$ ) также приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой сигнала измерений. Изменение положения плоскости наблюдения наиболее существенное влияние оказывает при  $\gamma - \frac{\pi - \alpha}{n}$ . При  $\alpha_2 = 0^\circ$ ,  $\varphi_1 = 0^\circ$  и  $\varphi_2 = 0^\circ$  появляются максимум в левой части кривой ( $x/D_2 < 1$ ) и минимум в правой части ( $x/D_2 \rightarrow 1$ ), с ростом  $\alpha_2$  возрастает значение  $W/W_0$  в максимуме и снижается значение  $W/W_0$  в минимуме. Несмотря на большую чувствительность к изменению угла раскрытия трещины при  $\alpha_2 = 0^\circ$ , изменение ориентации плоскости наблюдения может привести к снижению разрешающей способности метода при  $\alpha_2 \geq 45^\circ$ , так как поворот плоскости наблюдения при неизменном значении размеров приемного объектива равносителен снижению его площади в плоскости  $\alpha_2 = 0^\circ$ .

Разработанное испытательное оборудование по обнаружению поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает в свой состав гелий-неоновый лазер ЛГИ-224-1 ( $\lambda=0,6328$  мкм), стеклянную пластину для формирования опорного сигнала, два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов, плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения от источника к исследуемой поверхности и отраженного от поверхности излучения к фотоприемнику, устройство для перемещения образца. Величина опорного сигнала составляла  $\sim 6\%$  от интенсивности источника излучения.

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М, из алюминиевого сплава АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, стеклотекстолита АФТ-2П. Профиллограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе завода "Калибр" модели 250.

Как показали исследования, резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50...98% свидетельствует о наличии царапин,

трещин и повреждения покрытий. Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефектов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта. Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей апертуры и шаг сканирования превышает размеры дефекта. Наибольшая вероятность распознавания дефекта достигается в том случае, если диаметр пятна излучения на поверхности не превышает размеров дефекта и равен шагу сканирования. Разброс величины сигнала  $W/W_0$  увеличивается с ростом шероховатости поверхности. Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала  $W/W_0$  с ростом координаты  $x/x_0$  (образец из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла). Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины  $W/W_0$  (образец из стеклотекстолита АФТ-2П;  $R_a = 7,45 - W/W_0=0,49$ ;  $R_a = 4,8 - W/W_0=1,1$ ).

Износ участка поверхности образца из титанового сплава ВТ 14 характеризуется увеличением шероховатости и отклонением средней линии профиля, что соответствует снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца.

Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сигнала  $W/W_0$ . Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из стеклотекстолита). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин ( $W/W_0 \approx 0,03$ ). Наличие воды на поверхности образца приводит к снижению среднего уровня сигнала  $W_0$ , величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава ВТ 14 слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца, в 2 раза. Наличие повреждения регистрируется так же, как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости.

Существенное уменьшение габаритов испытательного оборудования возможно при использовании полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения. Были проведены исследования их флукутации мощности, распределения плотности мощности и отклонения излучения в пространстве. Наиболее распространенными материалами для лазерных диодов являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем. Приме-

рами таких лазеров являются GaAlAs/GaAl и AlGa-InP/InP лазерные диоды. Преимуществами лазеров с четверной системой являются изопериодичность гетероструктуры и отсутствие температурных деформаций, связанных с несоответствием параметров решеток подложки и активной области, высокая оптическая прочность зеркал, отсутствие "дефектов темных линий", слабое участие дислокаций в процессе деградации и, вследствие этого, более высокая долговечность и выходная мощность, отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и большая стабильность оси диаграммы направленности.

По сравнению с другими типами лазерных диодов лазеры с квантоворазмерными структурами имеют в 3 раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области и окружающей среды. Как показали исследования, они характеризуются отсутствием изгибов на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. Лазеры с квантоворазмерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты.

Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем.

Таким образом, построена математическая модель, описывающая изменение относительной величины сигнала  $W/W_0$  от безразмерной координаты  $x/B_1$  при сканировании по поверхности ( $B_1$  – поперечное сечение источника излучения) при различных соотношениях значений углов  $\alpha$  и  $\gamma$  (угла падения излучения и половины угла раскрытия трещины), когда размер поперечного сечения пучка и ширина трещины приблизительно равны (одного порядка),

$\Delta\gamma < \gamma$ . На участке поверхности с наличием трещины кривая изменения относительной величины сигнала имеет максимум или минимум в зависимости от глубины трещины. Угол раскрытия трещины, при котором имеется максимум на кривой, зависит от коэффициента отражения поверхности и угла падения излучения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива  $H_1$  оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой  $W/W_0$ . Поворот плоскости симметрии трещины возможно выявить лишь для неглубоких трещин ( $S/H_2 > 1$ ) при  $-5^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$ , при большом угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла  $\varphi_1$  не влияет на форму кривой. Наклон плоскости симметрии трещины приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой отраженного сигнала. Изменение положения плоскости наблюдения приводит к появлению дополнительных максимумов и минимумов. Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантоворазмерными структурами с активной областью на основе материалов четверных систем. Для учета флуктуации мощности источника излучения в процессе измерений необходимо формирование опорного канала.

#### **Выводы.**

Доказана необходимость сканирования поверхности при двух различных углах падения излучения, при этом величины  $n_1$  и  $n_2$  однозначно определяют геометрию повреждения.

При рассмотрении влияния параметров оптической системы на вероятность распознавания различных видов поверхностных повреждений установлено, что наибольшее влияние на вид зависимости относительной величины сигнала оказывает высота расположения приемного объектива над поверхностью. Ее оптимальное значение –  $H_2/B_1 \leq 1$ .

Рецензент: д. ф.-м. н., академик Ибраев А.Т.