

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕОТРАЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ПОВЕРХНОСТИ

Н.А. Сазонникова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Разработана математическая модель, описывающая формирование пространственно-временных характеристик отраженного лазерного сигнала на участках с дефектами поверхностного слоя в зависимости от вида повреждений. Введены безразмерные параметры процесса измерений при выявлении поверхностных повреждений, позволяющие установить энергетическое соответствие зондирующих сигналов геометрическим параметрам поверхностных дефектов и однозначно установить характер повреждений. Доказана необходимость сканирования поверхности при двух различных углах падения излучения.

* Работа выполнена под научным руководством профессора, доктора технических наук В.И. Мордасова.

Введение

Ограниченные возможности традиционных механических и оптических методов оценки поверхностных повреждений (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждений и др.) и случайный характер распределения самих повреждений и их параметров (глубины, угла раскрытия и расположения плоскости симметрии трещины, одновременное наличие различных видов повреждений и др.) требуют создания новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхности.

Преимуществами приборов, принцип действия которых основан на использовании лазерного излучения, являются бесконтактность, высокая информативность, быстроедействие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные измерительные приборы имеют существенное превосходство перед другими средствами контроля состояния поверхностей деталей и применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности [1-2]. Существующие оптические системы для дефектоскопии поверхностного слоя изделий [3-5] предназначены, в основном, для выявления трещин и забоин. Наличие повреждений такого рода определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного света или диффузно рассеянного трещиной. Возможно одновременное измерение этих двух составляющих.

Существуют оптические схемы, в которых одновременно регистрируются интенсивности зеркально отраженного и диффузно рассеянного излучения [5]. Измерение этих двух составляющих позволяет учитывать влияние флуктуаций интенсивности источника излучения и изменения состояния поверхности в пределах одной детали.

Оптимальным вариантом является оптическая дефектоскопическая система, в которой наличие повреждений определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного излучения, размеры дефекта определяются разницей координат, соответствующих изменению величины сигнала. При измере-

нии диффузно рассеянной составляющей излучение попадает на детектор только при наличии повреждений, в этом случае отсутствует возможность непрерывного контроля состояния поверхности - шероховатости, наличия рассеивающих частиц, окисной пленки на поверхности и др. Использование дополнительного фотоприемника для формирования опорного сигнала позволяет учитывать флуктуации интенсивности источника излучения. Определение повреждений целесообразно проводить по изменению относительной величины сигнала W/W_0 , где W_0 - среднее значение сигнала для поверхности исследуемого изделия. В этом случае нет необходимости регулировать в зависимости от материала детали величину светового потока, и падающего на исследуемую поверхность. Введение безразмерных параметров, определяемых по зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/x_0 (x_0 - шаг сканирования по поверхности), позволяет определить наличие повреждений и их характер (царапина, трещина, увеличение шероховатости поверхности в результате абразивного износа, наличие окисленного слоя или одновременное наличие двух видов повреждений).

Переотражение излучения в трещине

При построении математической модели изменения характеристик отраженного сигнала на участках поверхности с наличием повреждений примем следующие допущения: все изменения интенсивности и направления распространения излучения происходят в плоскости падения излучения (плоская задача), источник излучения - равномерно распределенный, бездефектная поверхность и поверхность трещины являются зеркально отражающими, коэффициент отражения принят постоянным по поверхности и не зависящим от температуры, дифракционные явления на поверхности не учитываются.

Так как наличие дефектов в виде трещин, царапин и забоин приводит, в первую очередь, к изменению направления распространения отраженного от поверхности излучения или его переотражению на данном элементе поверхности, то для выявления основных закономерностей допустимо считать поверхность зеркально отражающей. Изменение шероховатости и наличие рассеивающих частиц при-

водит к изменению соотношения сигнал/шум и не оказывает влияния на интенсивность и направление распространения переотраженного излучения. Допущения о сведении задачи к плоскому случаю, равенстве размеров источника излучения и приемного объектива и описание формы повреждений простейшими геометрическими фигурами упрощают рассматриваемую задачу, и, при этом, позволяют выявить основные закономерности рассматриваемых явлений.

Ранее были рассмотрены некоторые закономерности переотражения излучения в трещине треугольного сечения и определены зависимости изменения направления распространения излучения и ширины пучка на выходе из трещины, величины отраженного сигнала для случая совпадения направления распространения излучения на выходе из трещины с направлением зеркально отраженного от бездефектной поверхности излучения, условия попадания излучения на приемный объектив при незначительном увеличении или уменьшении угла раскрытия трещины (6).

Рассмотрим основные закономерности изменения направления и интенсивности переотраженного излучения в трещине с произвольным углом раскрытия, и определим основные безразмерные параметры процесса измерений.

Угол между вертикалью и направлением распространения излучения на выходе из трещины (рис. 1)

$$\beta_n = \pi - \alpha - 2n\gamma, \quad (1)$$

где α - угол падения излучения на исходную поверхность, γ - половина угла раскрытия трещины, n - число переотражений излучения.

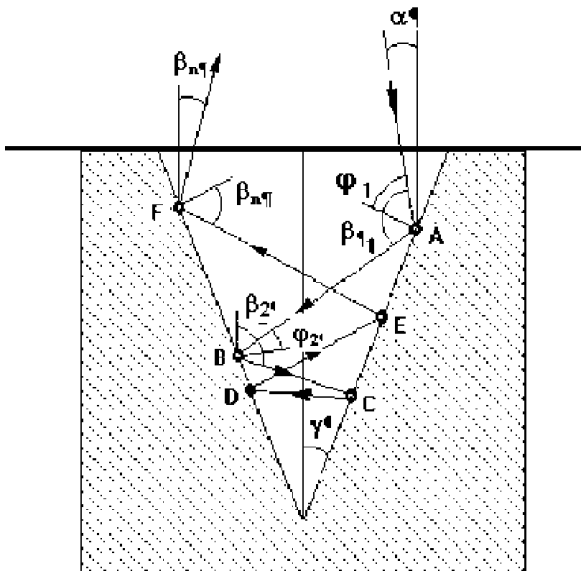


Рис. 1. Распространение излучения точечного источника в трещине

Число переотражений определяется соотношением

$$n = (\pi/2 - \alpha)/\gamma. \quad (2)$$

Отношение величины сигнала W при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности W_0 при $n=2$ для $H_2 \text{tg} \gamma < x < 2H_2 \text{tg} \gamma$ определяется выражением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\frac{B_1}{\cos \alpha} - x}{\frac{B_1}{\cos \alpha}} + \frac{A_2^2 (x - x_1)}{A_1 B_1 \cos \alpha}, \quad (3)$$

а для $H_2 \text{tg} \gamma < x < (H_2 \text{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha)$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \text{tg} \gamma}{\frac{B_1}{\cos \alpha}} + \frac{A_2^2 \left(x_2 - \left(x - \frac{B_1}{\cos \alpha} \right) \right)}{A_1 B_1 \cos \alpha}, \quad (4)$$

где A_2 - коэффициент отражения поверхности трещины, A_1 - коэффициент отражения бездефектной поверхности. При этом доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине для соотношения углов $\gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$, определяется координатой пятна x и не зависит от высоты расположения объектива над поверхностью H_1 . Аналогичная картина распространения излучения в трещине будет наблюдаться, при всех четных значениях n и неизменном значении ширины трещины. Координаты x_1 и x_2 имеют те же значения, что и для $n=2$, угол выхода излучения из трещины β_n соответствует углу β_2 при $n=2$. Значения W/W_0 определяются в соответствии с выражениями (5) и (6), во второе слагаемое вместо A_2^2 входит A_2^n . Для нечетных значений n излучение выходит из трещины в направлении источника.

При увеличении (уменьшении) угла раскрытия трещины на величину $\Delta\gamma$ ($\Delta\gamma \ll \gamma$) при прежнем значении угла α излучение, переотраженное трещиной, разделяется на два пучка, один из них направлен в сторону приемного объектива, второй - в сторону источника излучения (рис. 2).

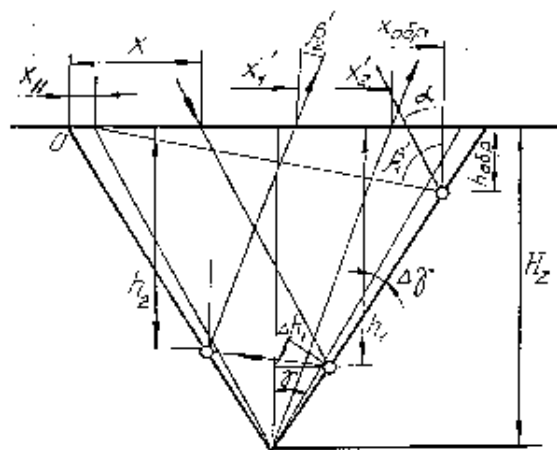


Рис. 2. Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на $2\Delta\gamma$

Ширина пучков и направление их распространения, условия попадания излучения на приемный объектив зависят от соотношения углов α и γ были опре-

делены ранее (6). Так как в этом случае $\beta_n \neq \alpha$, то величина полученного сигнала зависит от высоты расположения приемного объектива над поверхностью.

Зависимость изменения относительной величины сигнала от координаты определяется соотношением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{W_1}{W_0} + \frac{W_2}{W_0}. \quad (5)$$

Величина отраженного сигнала состоит из двух слагаемых: первое - интенсивность излучения, отраженного от бездефектной поверхности, второе - интенсивность излучения, переотраженного трещиной. Соотношение величин W_1 и W_2 определяется отношением диаметра пятна излучения на поверхности и ширины трещины и определяет вероятность обнаружения поверхностного дефекта.

Величина W_2/W_0 определяется геометрией повреждения и параметрами оптической системы - углом падения излучения на поверхность, углом установки приемного объектива и высотой расположения приемного объектива над поверхностью.

В зависимости от значения координаты x величины W_1/W_0 и W_2/W_0 принимают следующие значения:

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} \quad \text{при } x < 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \quad (6)$$

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} \quad \text{при } x > 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \quad (7)$$

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{(x_{\text{обр}} - (x - B_1 / \cos \alpha)) (x_2' - x_1' + \Delta_1')}{B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')}, \quad (8)$$

при $\Delta_1' < 0, \Delta_1'' > 0$,

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{(x - x_n) (-\Delta_1')}{B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')} \quad (9)$$

при $\Delta_1'' < 0, \Delta_2'' > 0$.

Значения координат изменения направления распространения излучения x_n и $x_{\text{обр}}$ были определены ранее (6). Величины $\Delta_1', \Delta_1'', \Delta_2''$ определяются из условия попадания излучения на приемный объектив:

$$\Delta_1' = x_1' - x - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha), \quad (10)$$

$$\Delta_1'' = x_1' - x + B_1 / \cos \alpha - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha), \quad (11)$$

$$\Delta_2'' = x_2' - x + B_1 / \cos \alpha - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0,5B_1 \sin \alpha), \quad (12)$$

На рис. 3 представлены зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для различных значений углов раскрытия трещины.

Наиболее важной характеристикой, определяющей направление выхода излучения из трещины β_n , координату изменения направления распространения излучения ($x_n, x_{\text{обр}}$) и интенсивность отраженного излучения является n - число переотражений излучения в трещине.

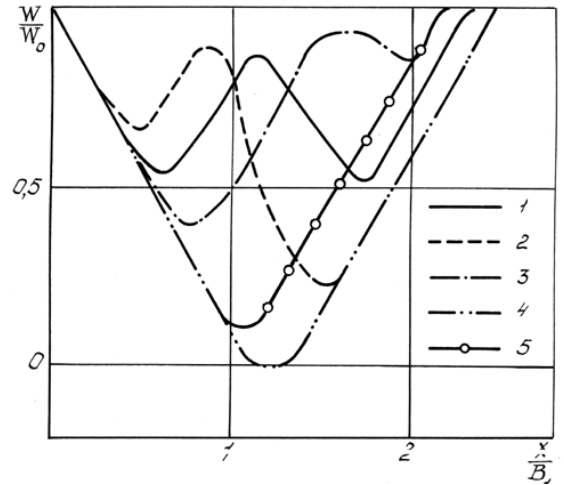


Рис. 3. Зависимость изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для $\alpha=30^\circ$ и различных значений угла раскрытия трещины 1 - $\gamma=30^\circ, n=2, S/B_1=1,152$ - $\Delta\gamma=3^\circ, n=1,8, S/B_1=1,3$, 3 - $\Delta\gamma=-3^\circ, n=2,2, S/B_1=1,02$, 4 - $n \rightarrow \infty, H_1/B_1=1, S/B_1=1,3$, 5 - $n \rightarrow \infty, H_1/B_1=1, S/B_1=1,02$

При повороте плоскости симметрии трещины ($\varphi_1 \neq 0$)

$$n = (\pi / 2 - (\alpha \pm \varphi_1)) / \gamma, \quad (13)$$

где «+» соответствует повороту плоскости симметрии трещины в сторону источника, «-» - в сторону приемного объектива.

Заметим, что значения n , определяемые по зависимостям (2), (13) могут иметь как целые, так и дробные значения в зависимости от значений α и γ , и представляют собой интегральную характеристику трещины. Целым значениям n соответствует $x_n = x_{\text{обр}} = 0$, т.е. все излучение, выходящее из трещины, распространяется в одном направлении. Для дробных значений n , например $n=2,2$, при $x < x_n$ число переотражений в трещине равно 3 (данная часть излучения распространяется в направлении источника), а для $x > x_n$ число переотражений в трещине равно 2 (данная часть излучения распространяется в направлении приемного объектива).

Значение n определяет вид зависимости $W/W_0 = f(x/B_1)$. При четных значениях n ($n = 2, 4, \dots, 2n$) и $S/(B_1 / \cos \alpha) > 1$ зависимость $W/W_0 = f(x/B_1)$ представляет собой симметричную кривую с максимумом или минимумом в центре, значение величины сигнала в центре трещины определяется величиной n . Для $n = 0, 1, 2, \dots, 3, \dots, 2n, \dots, 2n+1$ зависимость будет иметь вид кривой 3 на рис. 2, значения W/W_0 в максимуме и центре трещины определяются величиной n . Для $n = 1, 2, 3, \dots, 2n-1, \dots, 2n$ максимум на кривой $W/W_0 = f(x/B_1)$ смещен влево (зависимость 2 на рис. 2), максимальное значение W/W_0 и W/W_0 в центре трещины также определяются величиной n . При любых нечетных значениях n зависимость $W/W_0 = f(x/B_1)$ имеет минимум в точке $x/B_1 = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / 2 \cos \alpha$ (аналогично кривой 4 на рис. 3). Для $n \rightarrow \infty$ (для четных и нечетных значений n) зависимость $W/W_0 = f(x/B_1)$ имеет вид кривой 4 на рис. 3.

Таким образом, зависимость относительной величины сигнала W/W_0 в центре трещины от n будет иметь периодический характер (рис. 4).

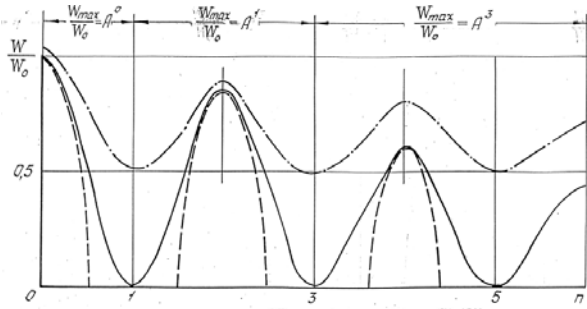


Рис. 4. Зависимость изменения относительной величины сигналов центре трещины $W_{ц.м.}/W_0$ от безразмерного параметра n при различных значениях высоты расположения приемного объектива над поверхностью H_1 и различных соотношениях размеров пятна и ширины трещины $(B_1/\cos\alpha)/S$: 1 - $H_1=0$, $(B_1/\cos\alpha)/S=1$, 2 - $H_1=B_1$, $(B_1/\cos\alpha)/S < 1$, 3 - $H_1=0$, $(B_1/\cos\alpha)/S=2$

Расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает существенное влияние на форму зависимостей $W/W_0=f(x/B_1)$ и $W_{ц.м.}/W_0=f(n)$. Только при $\beta_n = \pm \alpha$ при любых значениях H_1 вид зависимости $W/W_0=f(x/B_1)$ остается неизменным, значение $W_{ц.м.}/W_0$ не зависит от соотношения H_1/B_1 . В остальных случаях в соответствии с зависимостями (6)-(12) с увеличением расстояния от исследуемой поверхности до приемного объектива происходит снижение относительной величины сигнала. При $H_1/B_1 > 0$ функция $W_{ц.м.}/W_0=f(n)$ не является непрерывной и имеет вид зависимости 2 на рис. 4. При $H_1/B_1 \geq 1$ значение относительной величины сигнала в центре трещины при четных значениях n равно $W_{ц.м.}/W_0=A^{n-1}$. Для других значений n $W_{ц.м.}/W_0$ равно нулю.

Описанная в математической модели область изменения значений угла раскрытия трещины соответствует $20^\circ < \gamma < 60^\circ$ ($1 < n < 3$). Область изменения угла γ , соответствующая различным видам повреждений (окисная пленка, износ поверхности, царапины, глубокие и неглубокие трещины) охватывает $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$.

Рассмотренную область изменения значений угла γ можно условно разбить на несколько областей, каждая из которых соответствует определенному виду повреждений:

1. Глубокие трещины ($n > 6$). Для этого вида повреждений на кривой изменения относительной величины сигнала W/W_0 от координаты x/B_1 имеется минимум в точке, соответствующей середине трещины при любых значениях H_1 и $\gamma = (\pi/2 - \alpha)/n$.

2. Неглубокие трещины ($2 < n < 6$). Для таких повреждений на кривой изменения W/W_0 от координаты x/B_1 имеется максимум в точке $x/B_1 = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1/2 \cos \alpha$. При $H_1/B_1 = 1$.

3. Царапины ($n < 2$). Для этого вида повреждений характерно $H_2/S < 1$ и $S/B_1 \geq 0$, $W/W_0 > 0$ при всех значениях x/B_1 для любых значений γ .

4. Износ поверхности ($0 < n < 1$). По сравнению с перечисленными повреждениями поверхности, этот дефект характеризуется большей протяженностью и более высокими значениями W/W_0 в центре дефекта. $n=1$ соответствует отражению излучения от поверхности повреждения и распространению отраженного излучения в направлении источника ($\gamma, < 90^\circ$), $n=0$ соответствует однократному отражению излучения от поверхности и его распространению в направлении приемного объектива, $\gamma=90^\circ$.

5. Окисная пленка на поверхности ($n \approx 0$). Данное повреждение характеризуется изменением цветности и шероховатости поверхности при $H_2=0$ ($n=0$, $\gamma=90^\circ$). Для выявления такого дефекта значения H_1 не оказывают существенного влияния. В отличие от других дефектов окисная пленка характеризуется увеличением разброса величины W/W_0 , а не снижением или увеличением относительной величины сигнала.

Для двух различных углов падения излучения отношение n_1/n_2 будет иметь вид:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\pi/2 - (\alpha_1 \pm \varphi_1)}{\pi/2 - (\alpha_2 \pm \varphi_1)} \quad (14)$$

На рис. 5 показаны зависимости $n_2=f(n_1)$, построенные в соответствии с зависимостью (14) для различных значений α_1 , α_2 и φ_1 .

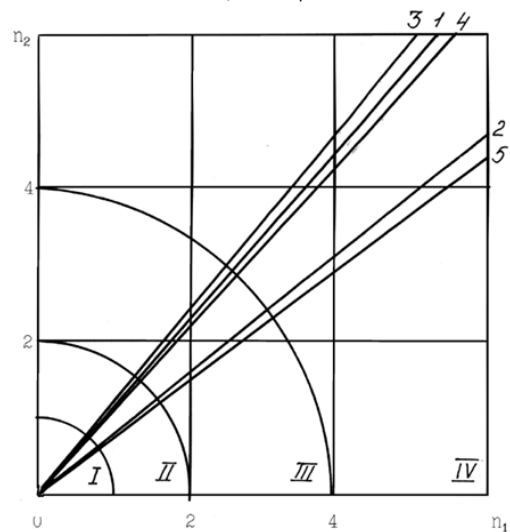


Рис. 5. Зависимость безразмерного параметра n_2 от значений безразмерного параметра n_1 при различных значениях углов падения излучения α_1 , α_2 и угла поворота плоскости симметрии трещины φ_1 :

- 1 - $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$; 2 - $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$; 3 - $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\varphi_1 = +5^\circ$; 4 - $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$, $\varphi_1 = -5^\circ$; 5 - $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$, $\varphi_1 = +5^\circ$

Зная n_1/n_2 , можно определить величину φ_1 , а затем γ по зависимостям (14). Для $20^\circ < \alpha_1, \alpha_2 < 45^\circ$ на зависимости $n_2=f(n_1)$ также можно выделить области, соответствующие различным видам повреждений. $n=0$ соответствует бездефектной поверхности или поверхности с наличием окисной пленки (по сравнению с бездефектной поверхностью окисная пленка характеризуется изменением средней вели-

чины сигнала W_0 и увеличением разброса W/W_0 относительно среднего значения), I - соответствует абразивному износу и прогибу поверхности ($0 < n < 1$), II - область царапин ($1 < n < 2$), III - область неглубоких трещин ($2 < n < 6$), IV - область глубоких трещин ($n > 6$).

Основными критериями подобия при рассмотрении процесса отражения излучения от поверхности являются:

1. n - число переотражений излучения в трещине или другом элементе поверхности. Этот параметр является интегральной характеристикой дефекта и зависит от его геометрии и угла падения излучения. Параметр n численно равен отношению длины кривой, образованной пересечением плоскости падения излучения с поверхностью трещины к проекции ширины трещины под углом падения излучения на эту кривую. В общем случае для трещины, форма которой описывается аналитической зависимостью $f(x,y)$ параметр n определяется соотношениями:

$$\int_L f(x,y) dl = \sum_{i=1}^n l_i$$

$$\int_{l_i} f(x,y) dy = S \operatorname{ctg} \alpha_i \quad (15)$$

Как видно из полученных зависимостей, n определяет не только среднее число переотражений излучения в трещине, но и ширину, и направление распространения выходящих из трещины пучков.

2. $K_1 = \frac{B_1}{\lambda}$ - параметр оптической системы, при $B_1/\lambda \gg 1$ измеряется интенсивность переотраженного излучения на всех элементах поверхности с характерным размером $\geq B_1$ и рассеяние на элементах микротопологии поверхности. При $B_1/\lambda \sim 1$ измеряется интенсивность переотраженного излучения на микро- и макроэлементах топологии поверхности.

$K_2 = \frac{B_1}{S}$ - характеризует соотношение диаметра пятна излучения на поверхности и размеров дефектов (элементов поверхности). Этот параметр определяет разрешающую способность оптической системы при выявлении элементов поверхности, ведущих к переотражению излучения. При заданной величине B_1 могут быть выявлены повреждения, для которых выполняется соотношение $K_2 = B_1/S \leq 2$. Влияние элементов поверхности с меньшими размерами ($K_2 \leq 2$) усредняется в пределах пятна и не приводит к значительному изменению величины отраженного сигнала. Ширина трещины наиболее точно может быть определена при $K_2 = B_1/S \leq 1$, в этом случае наблюдается наибольшее снижение величины сигнала при наличии трещин.

3. $K_3 = \frac{K_1}{K_2} = \frac{S}{\lambda}$ - является характеристикой дефекта (элемента поверхности), независимой от параметров оптической системы.

Построены зависимости $E_3 = f(K_1)$ при $K_3 \leq 1$, $E_3 = f(K_3)$ при $K_1 = 1$, $E_3 = f(K_3)$ и $E_2 = f(K_3)$ (рис. 6, 7). При

$n > 2$ наибольшее влияние на значение относительной величины сигнала оказывает величина E_3 , при $0 < n < 2$ переотражение (величина E_3) и рассеяние на микронеровностях поверхности (величина E_2) имеют одинаковый порядок.

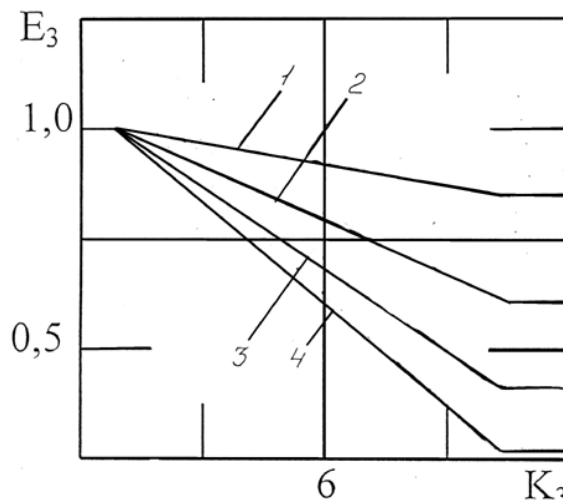


Рис. 6. Зависимость относительной величины переотраженного сигнала в центре дефекта E_3 от параметра геометрии K_3 при $K_1 > 1$:
1 - $n=2$, 2 - $n=4$, 3 - $n=6$, 4 - $n=8$

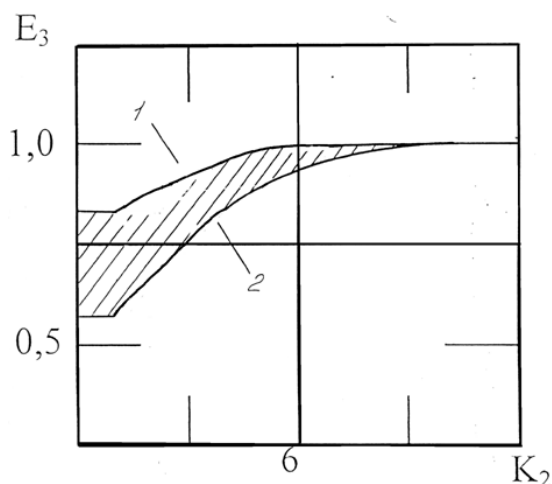


Рис. 7. Влияние параметра K_2 на величину переотраженного сигнала:
1 - W_{max}/W_0 для $n=2$,
2 - $W_{u.m.}/W_0$ для $\alpha=30^\circ$ и $\gamma=27^\circ$

Заключение

Разработана математическая модель, описывающая формирование пространственно-временных характеристик отраженного лазерного сигнала на участках с дефектами поверхностного слоя в зависимости от вида повреждений. Введены безразмерные параметры процесса измерений при выявлении поверхностных повреждений, позволяющие установить энергетическое соответствие зондирующих сигналов геометрическим параметрам поверхностных дефектов и однозначно установить характер повреждений: K_1 - параметр оптической системы, K_2 - параметр, характеризующий соотношение диаметра пятна излучения на поверхности и разме-

ров дефектов и определяющий разрешающую способность оптической системы, K_3 – параметр дефекта (элемента поверхности).

Выявлено, что основной характеристикой дефекта является параметр n , который численно равен числу переотражений. Определены его характерные значения при $\alpha=\pi/6$. Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала в центре трещины от угла раскрытия трещины и параметра n . 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 – $H_1/V_1 \leq 1$.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Гранты 71В-Б082-201, 72В-Б065-204).

Литература

1. P.T. Chang, I. Kaufman, D.Y. Shyong Detection and imaging of surface cracks by optical scanning // "Mater. Eval.", 1987, V.45, N8, p. 943-945.
2. Кукса Н.Н. Влияние площади считывающей апертуры фотоэлектрического дефектоскопа на вероятность пропуска дефекта // Дефектоскопия. 1984. N 4. С. 57-64.
3. Белопухов В.Н., Волостников В.Г., Котляр В.В., Малов А.Н., Подвигин В.Н. Когерентно-оптическое обнаружение дефектов на поверхности изделий // Лазерная технология и автоматизация исследований (Труды ФИАН, т.198) М.: Наука, 1989. С.111-115.
4. An-Shyang Chu and M.A. Butler. Laser surface profiler//Optics Letters, 1999, Vol. 24. N. 7. P. 457-459.
5. Сазонникова Н.А., Мордасов В.И., Шуваев А.А. Оптический способ оценки поверхностных повреждений // Компьютерная оптика, МЦНТИ, 2000, В. 20. С. 106 – 110.
6. Авторское свидетельство СССР N 381885, кл. G 01B 11/30, 1973.