

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕЩИНОЙ УСТАЛОСТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

А. Я. ТЕТЕРКО, В. И. ГУТНИК

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: ayateterkowi@yahoo.com

На основе решений задач для аномального электромагнитного поля протяженной тонкой трещины и цилиндрического включения с произвольным значением удельной электропроводности показано, что для усталостной трещины составляющая поля рассеяния областью структурно измененного материала в окрестности трещины может многократно превосходить составляющую поля дифракции на границах трещины и зависит от характеристик этой области. Поэтому при вихретоковом контроле изделия установка браковочного уровня по сигналу от эталонной искусственной трещины должна основываться на учете физико-химических условий образования трещины в процессе эксплуатации данного изделия. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, усталостная трещина, удельная электропроводность, аномальное электромагнитное поле

В вихретоковой (ВТ) дефектоскопии модель объекта контроля (ОК) с дефектом типа трещины базируется на электродинамическом анализе кусочно-однородной структуры и отображает дифракционную суть формирования трещиной аномального поля (АП) дефекта [1, 2]. Согласно этой традиционной модели аномальная составляющая поля дефекта в результирующем электромагнитном поле (ЭМП) формируется вследствие дифракции первичного ЭМП на границах трещины. Однако такая модель только частично отражает процесс формирования АП реальной или так называемой усталостной трещиной, зарождающейся и развивающейся в конструкционных материалах в процессе эксплуатации изделий [3, 4]. Недостатком традиционной модели является то, что она не учитывает значительных изменений электрофизических характеристик материала ОК, обусловленных структурными изменениями материала в окрестности трещины в процессе ее образования.

В механике разрушения материалов различают три вида разрушений: хрупкое, квазихрупкое и вязкое. Для конструкционных материалов характерны хрупкое и квазихрупкое разрушение. В процессе зарождения и развития трещины выделяют четыре основные стадии [3], изменение структуры материала в которых представляет интерес с точки зрения ВТ дефектоскопии, а именно: инкубационный период, характеризующийся изменением субструктуры во всем объеме металла и концентрацией пластической деформации в приповерхностном слое вследствие его технологической дефектности; зарождение системы субмикротрещин в приповерхностном слое, где рас-

тет концентрация напряжений; распространение систем микротрещин и образование магистральной макротрещины; рост макротрещины до критического размера.

При этом отметим, что чувствительность ВТ контроля позволяет исследовать процесс зарождения и развития трещин на всех стадиях [5].

При достижении критического размера макротрещина растет спонтанно до момента разрушения. Продолжительность этой стадии мала и не имеет практического значения для прогнозирования. Однако период структурных изменений материала до зарождения макротрещины и ее развития до критического размера обычно довольно длительный и зависит от материала, схемы и характера нагрузок, температуры и свойств рабочей среды [3, 6–8], что чрезвычайно важно для выработки браковочного критерия при неразрушающем контроле конкретного изделия.

В результате структурных изменений в окрестности трещины формируется область, удельная электропроводность и магнитная проницаемость материала в которой существенно отличаются от основного материала. Так, удельная электропроводность может изменяться на десятки процентов. Значительно больше, особенно для аустенитных сталей, может изменяться магнитная проницаемость. Размеры этой области по ширине составляют от сотен микрон до нескольких миллиметров, а ее объем на 3...4 порядка превышает объем между берегами трещины [9]. Учитывая значительные размеры области структурно измененного материала в окрестности усталостных трещин, рассеяние первичного ЭМП в этой области существенно влияет на формирование АП трещины, а сигнал вихретокового преобразователя от усталостной

трещины может значительно превосходить сигнал от искусственной трещины такой же глубины. Поэтому нормативными документами предусматривается, что контрольный образец с искусственным (эталонным) дефектом, например, типа трещины в виде тонкого разреза заданной ширины и глубины должен использоваться только для установки уровня сигнала отбраковки деталей аппаратурой ВТ контроля [10]. При этом принимается, что контроль обеспечивает обнаружение трещин, глубина которых в 5...7 раз меньше глубины эталонной трещины. Однако следует иметь в виду, что соотношение сигналов глубина эталонной/глубина усталостной трещины, которое задают при установке браковочного уровня, существенно зависит от материала и условий эксплуатации конкретной детали и не может быть унифицировано для широкой номенклатуры деталей и изделий.

Цель работы – исследование оценки составляющей аномального поля, обусловленной локальной областью структурно измененного материала в окрестности усталостных трещин, в сравнении с составляющей поля дифракции на трещине.

Поскольку в теории ВТ контроля соответствующая физическая модель формирования аномального поля усталостной трещиной не рассматривалась [1, 11], то для исследования нами используются полученные в строгой постановке решения таких двух задач: аномальное ЭМП тонкого продольного дефекта типа трещины в электропроводящем полупространстве [12] и аномальное ЭМП кругового цилиндрического включения в электропроводящем полупространстве [13]. При этом под строгой постановкой понимается, что при сведении исходной физической задачи к математической были использованы лишь основные законы электромагнетизма и математические теоремы.

Аномальное поле трещины в электропроводящем полупространстве. На рис. 1 представлена схема протяженного дефекта типа трещины в однородном электропроводящем полупространстве.

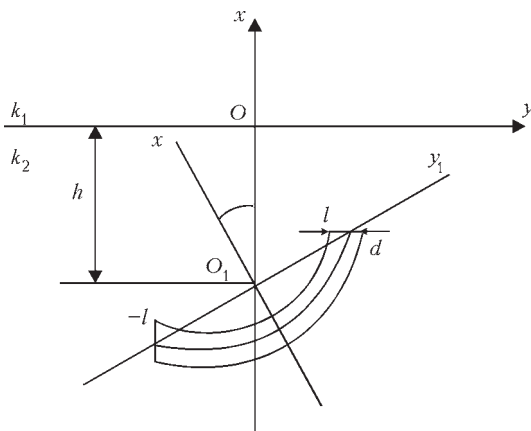


Рис. 1. Схематическое изображение трещины (обозначения см. в тексте)

Здесь (xOy) – базовая и $(x_1O_1y_1)$ – локальная системы координат. Параметры трещины охарактеризованы длиной l , шириной раскрытия d , глубиной залегания h , углом наклона к поверхности α и кривизной ε ; $k_1 = 0, k_2 \neq 0$ – волновые числа верхнего и нижнего полупространства. Первичное электромагнитное поле представляет собой E_z – поляризованную плоскую волну.

Как показано в работе [1], для тонкого диэлектрического включения электрическая составляющая поля изменяется по его толщине незначительно, поэтому принимается независимой от толщины дефекта и равной некоторому значению на его средней линии L , где L – гладкий контур Ляпунова. При этом решение задачи дифракции первичного ЭМП на тонкой трещине сведено к интегральному уравнению:

$$E(t_0) - d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(2)}(t, t_0) ds = E^*(t_0), \quad (1)$$

где $G^{(2)}(t, t_0) = (i/4)H_0^{(1)}(k_2 r) + (1/(2\pi)) \times$

$$\begin{aligned} & \times \int_0^\infty \exp[v_2(y + y_0)] \times \\ & \times (v_2 - v_1) / [v_2(v_1 + v_2)] \cos(q(x - x_0)) dq; \\ & v_{1,2} = \sqrt{q^2 - k_{1,2}^2}; \quad \text{Re}(v_{1,2}) \geq 0; \\ & t = t(s) \equiv x(s) + iy(s); \quad t_0 = L. \end{aligned}$$

Здесь $H_0^{(1)}(k_2 r)$ – функция Ганкеля первого рода; $E^*(t_0)$ – известное распределение электрической (вдоль оси Oz) составляющей ЭМП при отсутствии трещины; $E(t)$ – неизвестное распределение электрической составляющей ЭМП, обусловленное наличием трещины; s – дуговая абсцисса средней линии L сечения трещины плоскостью xOy ; r – расстояние между двумя точками контура L с аффиксами t и t_0 и дуговыми абсциссами s и s_0 ; k_3 – волновое число включения; $G^{(2)}(t, t_0)$ – функция Грина дифракционной задачи для полупространства.

В результате решения на основе метода механических квадратур для интегрального уравнения в работе [12] получена алгебраическая система уравнений:

$$\begin{aligned} E_l - \sum_{k=1}^N a_{lk} E_k &= E_l^*, \quad l=1, \dots, N, \quad (2) \\ E_l &= E(\tau_l), \quad E_l^* = E^*(\tau_l), \quad t \in \hat{t}(\tau), \\ a_{lk} &= (d(k_2^2 - k_3^2) / (2\pi)) A_k \left| \frac{t'_k}{t'_l} \right| (S(\tau_k, \tau_l) + K(\tau_k, \tau_l)), \\ K(\tau_k, \tau_l) &= 2\pi G^{(2)}(t_k, t_l) + \ln |\tau_k - \tau_l|, \\ t'_k &= t'_k(\tau_k), \end{aligned}$$

где A_i – весовые коэффициенты; τ_i – узлы в квадратных формулах.

На основании решения системы уравнений (2) напряженность электрического поля в верхнем полупространстве рассчитывается по формуле:

$$E(x, y) = E^*(x, y) + d(k_2^2 - k_3^2) \sum_{k=1}^N A_k G^{(1)}(t_k, t) E_k, \quad (3)$$

$$\text{где } G^{(1)}(t_k, t) = (1/\pi) \int_0^\infty \exp[y_k v_2 - y v_1] \times \\ \times \cos(q(x_k - x)) / (v_1 + v_2) dq; \\ t = x + iy; t_k = x_k + iy_k;$$

а составляющие напряженности аномального магнитного поля трещины определяются следующими соотношениями:

$$H_x^a(x, y) = \frac{-i}{\omega \mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(1)}(t, t_0) ds \right), \quad (4)$$

$$H_y^a(x, y) = \frac{i}{\omega \mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(1)}(t, t_0) ds \right). \quad (5)$$

На рис. 2 представлена зависимость нормированной к первичному ЭМП составляющей $H'_{ya}(L, h_{зал})$ аномального поля трещины в эпикентральной точке ($x = 0, y = 0$) на поверхности полупространства (см. рис. 1) от длины и глубины залегания трещины. При этом глубину залегания трещины под поверхностью удобно рассматривать как остаточную толщину $h_{зал}$, или расстояние от поверхности полупространства до вершины трещины. Ширина трещины составляет $d = 0,2$ мм; длина трещины изменяется в интервале $0,1 \dots 1,7$ мм, а глубина залегания в интервале $0,1 \dots 1,0$ мм; удельная электропроводность принята равной $\sigma_2 = 16$ МСм/м. Частота первичного ЭМП составляет $f \approx 2$ кГц, глубина проникновения вихревых токов $\delta = \sqrt{2/\omega \sigma_2 \mu_0} \approx 2,8$ мм.

Размеры эталонной искусственной трещины, по сигналу от которой устанавливают в аппаратуре ВТ контроля уровень отбраковки, могут составлять $0,1 \dots 0,2$ мм по ширине и по глубине ми-

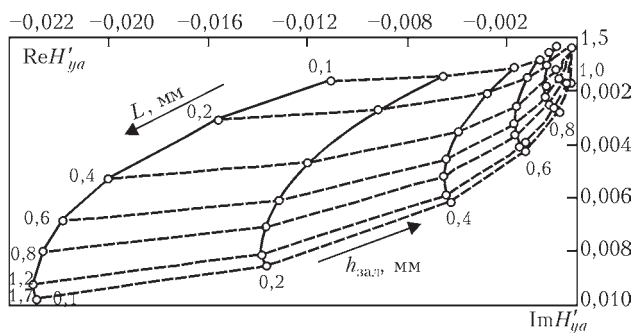


Рис. 2. Годографы зависимости составляющей H'_{ya} аномального поля от длины трещины

нимум $0,5$ мм. Из годографов видно, что уровень составляющей $\text{Mod } H'_{ya}$ аномального поля эталонной трещины таких размеров может составлять до 2% уровня первичного ЭМП. При этом аппаратура ВТ контроля, как полагается в работе [10], должна обеспечивать обнаружение трещин в изделии с минимальной глубиной около $0,05$ мм. Усталостные трещины такой глубины имеют раскрытие d в несколько микрон, что практически на два порядка меньше раскрытия $d = 0,2$ мм искусственной эталонной трещины. В расчетных формулах раскрытие трещины d входит как масштабный множитель, что определено постановкой задачи. При этом уровень аномального поля трещины глубиной $0,05$ мм (без учета влияния области структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины) должен быть на два порядка меньше, т.е. около $0,02\%$ уровня первичного электромагнитного поля. Чтобы корректно оценить уровень аномального поля, обусловленного областью структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины, воспользуемся решением задачи дифракции ЭМП на круговом цилиндрическом электропроводящем включении в электропроводящем полупространстве [13].

Аномальное поле электропроводящего включения. На рис. 3 представлена схема цилиндрического включения радиуса a , удельная электропроводность которого может иметь произвольное значение. В частности, для рассматриваемого случая удельная электропроводность включения имитирует структурно измененный материал в процессе образования трещины и задана в интервале $0 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2$. Это позволяет исследовать как влияние несплошности ($\sigma_3 = 0$) в основном материале, так и влияние локального изменения удельной электропроводности на формирование составляющей аномального поля в результирующем ЭМП. Первичное электромагнитное поле представляет собой E_z – поляризованную плоскую волну.

Для расчета составляющих векторов аномального поля цилиндрического включения в электропроводящем полупространстве дифракционная задача сведена к решению скалярного волнового уравнения относительно z -компоненты векторного потенциала ЭМП [13].

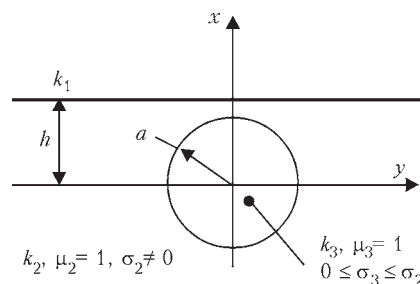


Рис. 3. Схема цилиндрического включения

Формулы для расчета составляющих напряженности аномального магнитного поля включения в отношении к нормальной составляющей результирующего поля имеют следующий вид:

$$H'_{ra} = (C_*^e - 1) e^{-k_2 h} e^{k_2 r \cos \varphi} \sin \varphi + 0,5 e^{-k_2 h} C_*^e \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n p_n^e [K_{n-1}(k_2 r) - K_{n+1}(k_2 r)] \sin n\varphi, \quad (6)$$

$$H'_{\phi a} = (C_*^e - 1) e^{-k_2 h} e^{k_2 r \cos \varphi} \cos \varphi + 0,5 e^{-k_2 h} C_*^e \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n p_n^e [K_{n-1}(k_2 r) + K_{n+1}(k_2 r)] \cos n\varphi, \quad (7)$$

где $C_*^e = \left(1 + e^{-k_2 h} \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k p_k^e K_k(k_2 h) \right)^{-1}$;

$$\gamma_n = \begin{cases} 1, & n, k = 0; \\ 2, & n, k = 1, 2, 3 \dots \end{cases}$$

Влияние параметров цилиндрического включения определяется коэффициентом p_n^e . Для случая, когда материал включения электропроводящий ($\sigma_3 \neq 0$), коэффициент p_n^e определяется выражением:

$$p_n^e = \frac{k_3 I_n(k_2 a) I'_n(k_3 a) - k_2 I'_n(k_2 a) I_n(k_3 a)}{k_3 K_n(k_2 a) I'_n(k_3 a) - k_2 K'_n(k_2 a) I_n(k_3 a)}, \quad (8)$$

где $k_2 = \sqrt{i\omega\sigma_2\mu_0}$; $k_3 = \sqrt{i\omega\sigma_3\mu_0}$,
 $\sigma_2 \neq 0$; $\sigma_3 \neq 0$.

В случае неэлектропроводящего включения ($\sigma_3 = 0$) коэффициент p_n^e определяется выражением:

$$p_n^e = -\frac{I_{n+1}(k_2 a)}{K_{n+1}(k_2 a)}. \quad (9)$$

В формулах (6)–(9) значения радиуса включения и глубины его залегания задаются в безразмерном виде, а именно – в отношении к глубине проникновения вихревых токов:

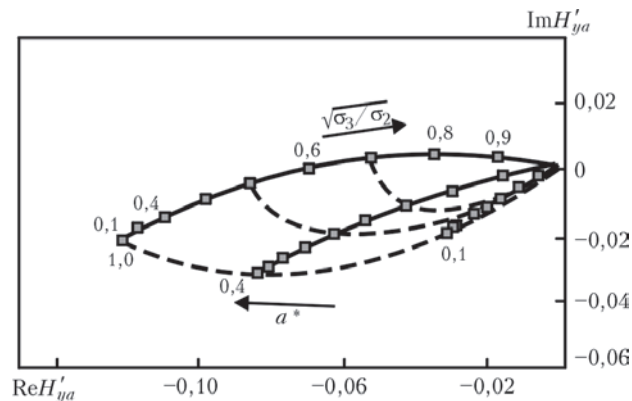


Рис. 4. Годографы влияния параметров цилиндрического включения на его АП

$$a^* = a\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0} \text{ и } a^* = a\sqrt{\omega\sigma_3\mu_0}, \quad h^* = h\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0}. \quad (10)$$

На рис. 4 представлена зависимость составляющей аномального поля включения $H'_{ya}(a^*; \sigma_3/\sigma_2)$ в эпицентральной точке ($x = h = a, y = 0$) на поверхности электропроводящего полупространства (см. рис. 3) от изменения радиуса включения в интервале значений $a^* = a\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0} = 0 \dots 1,0$ и изменения удельной электропроводности включения в интервале $0 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2$ для приповерхностного расположения включения $h = a$.

Из приведенных зависимостей видно, что величина удельной электропроводности включения оказывает значительное влияние на уровень АП. При этом выбором частоты ЭМП можно задавать величину радиуса a^* включения. Например, при $a^* = 0,4$ (соответствует $a = 12$ мм, $f \approx 25$ кГц, $\sigma_2 = 16$ МСм/м) и уменьшении удельной электропроводности включения на 20 % ($\sigma_3 = 0,8\sigma_2$) составляющая АП $\text{Mod } H'_{ya}$ будет $\approx 1,5$ % (рис. 4). При изменении электропроводности включения до 50 % составляющая АП $\text{Mod } H'_{ya}$ увеличится примерно до 4 %.

Очевидно, что составляющая АП области структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины, характеризующаяся значительным объемом, может многократно превышать составляющую АП трещины.

Значительное изменение уровня АП при малых размерах локального включения ($a = 0,12$ мм) свидетельствует о перспективности исследования в механике разрушения материалов процессов образования усталостных трещин вихретоковым методом [3–5]. При этом современные методы обработки сигналов вихретокового преобразователя позволяют определять параметры включения [13], в частности, изменение его удельной электропроводности на разных стадиях развития трещины.

Штриховая кривая на рис. 4 соответствует приповерхностной цилиндрической полости ($\sigma_3 = 0$). Для заданных выше значений раскрытия трещины $d = 0,2$ мм, частоты $f \approx 2$ кГц и удельной электропроводности $\sigma_2 = 16$ МСм/м относительное значение радиуса полости равно $a^* = 0,05$ ($2a = 0,2$ мм). Значение составляющей $\text{Mod } H'_{ya}$ аномального поля такой несплошности составляет примерно 15 %, что сопоставимо с уровнем АП эталонной трещины.

Аномальное поле усталостной трещины может быть представлено суперпозицией элементарных включений по сечению трещины, включая область структурно измененного материала в окрестности трещины [13]. В качестве элементарного могут быть приняты цилиндрическое вклю-

Погрешность приближения аномального поля трещины элементарными включениями в зависимости от частоты ЭМП при различной ориентации и глубине залегания трещины

$k_3 = \sqrt{0,75}k_2$	$\alpha = 90^\circ$			0			45°			
	ω , рад/с	10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5
$h_{\text{зал}} = 1,0 \text{ мм}$	$n = 2$	0,05799	0,96038	4,06494	0,05398	0,94278	11,4058	0,05711	0,96090	7,25687
	$n = 4$	0,08612	1,43608	7,00203	0,08026	1,41932	17,9117	0,08487	1,44157	11,9221
	$n = 6$	0,09524	1,59226	8,22466	0,08877	1,57684	20,1751	0,09387	1,59995	13,6185
	$n = 8$	0,09971	1,66955	8,89397	0,09295	1,65488	21,3169	0,09829	1,67838	14,4932
	$n = 10$	0,10237	1,71556	9,31463	0,09542	1,70136	22,0031	0,10091	1,72508	15,0260
$h_{\text{зал}} = 1,5 \text{ мм}$	$n = 2$	0,05951	0,95656	4,03882	0,05650	0,96206	11,3586	0,05888	0,96111	7,21087
	$n = 4$	0,08843	1,43458	6,96798	0,08404	1,44869	17,8349	0,08754	1,44460	11,8597
	$n = 6$	0,09782	1,59187	8,18868	0,09297	1,60957	20,0879	0,09685	1,60412	13,5510
	$n = 8$	0,10243	1,66975	8,85717	0,09736	1,68930	21,2243	0,10142	1,68313	14,4234
	$n = 10$	0,10516	1,71612	9,27737	0,09996	1,73677	21,9073	0,10412	1,73018	14,9547
$h_{\text{зал}} = 2,0 \text{ мм}$	$n = 2$	0,06064	0,95016	4,01947	0,05846	0,96645	11,3561	0,06022	0,95665	7,17812
	$n = 4$	0,09017	1,42766	6,94647	0,08697	1,45527	17,8319	0,08957	1,43963	11,8199
	$n = 6$	0,09975	1,58502	8,16789	0,09624	1,61684	20,0850	0,09910	1,59911	13,5096
	$n = 8$	0,10446	1,66296	8,83685	0,10079	1,69691	21,2215	0,10378	1,67812	14,3813
	$n = 10$	0,10725	1,70937	9,25736	0,10348	1,74459	21,9046	0,10656	1,72517	14,9123

чение или короткая трещина. Для моделирования АП усталостной трещины корректно использовать цилиндрическое включение, где учитывается и удельная электропроводность $\sigma_k(x_k, y_k)$ материала, и радиус $a_k(x_k, y_k)$ каждого элементарного включения. Кроме того, расчетные формулы (6)–(9) для АП цилиндрического включения просты и удобны для инженерных расчетов. В то же время решением для АП продольной трещины воспользуемся для оценки ошибки приближения АП включения типа трещины суперпозицией коротких трещин, расположенных вплотную по длине трещины.

На рис. 5 приведена схема трещины, которая изображена суперпозицией коротких трещин. В таблице представлены данные о погрешности приближения трещины длиной $l = 2 \text{ мм}$, представленной $n = 2, 4, 6, 8, 10$ короткими трещинами, залегающей на разной глубине $h_{\text{зал}} = 1,0; 1,5; 2,0 \text{ мм}$ и ориентированной под разными углами к поверхности. Удельная электропроводность материала включения принята равной $\sigma_2 = 0,75 \sigma_1$; частота первичного ЭМП составляет $\omega = 10^3; 10^4; 10^5 \text{ рад/с}$.

Полученные результаты показывают, что на низких частотах ($\omega = 10^3; 10^4 \text{ рад/с}$), когда длина волны ЭМП в электропроводящем полупространстве в сравнении с длиной трещины увеличива-

ется, погрешность приближения не превышает 2,0 %. Отметим также, что с увеличением количества элементов n погрешность приближения возрастает, поскольку взаимодействием между элементами в суперпозиции пренебрегается.

Подобные результаты получены и для приближения кругового включения равной по площади сечения суперпозицией элементарных включений. Аппроксимация аномального поля эталонной трещины (раскрытие $d = 0,2 \text{ мм}$; длина трещины изменяется в интервале $0,5 \dots 1,7 \text{ мм}$) суперпози-

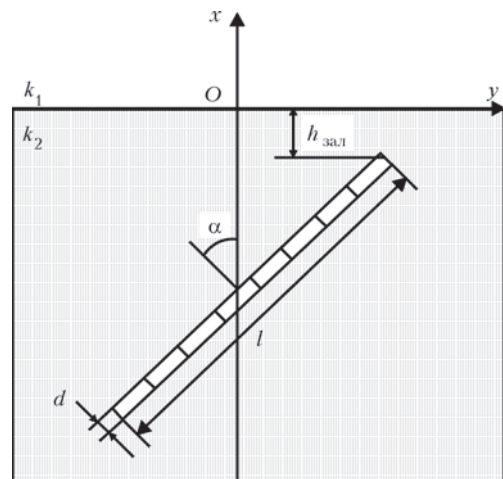


Рис. 5. Схематическое изображение трещины в виде суперпозиций коротких трещин

цией цилиндрических включений ($\sigma_3 = 0$) с эквивалентными параметрами показала, что составляющая $\text{Mod } H'_{ya}$ изменяется в интервале 1,3...1,6 % и хорошо согласуется с представленными выше результатами расчета для искусственной трещины (см. рис. 2). При этом важно отметить, что для приповерхностной трещины с увеличением длины трещины более 0,5...0,6 мм увеличение уровня АП быстро падает и при $L > 1,5$ мм практически не изменяется. Эта «граничная» длина трещины определяется глубиной проникновения вихревых токов и, соответственно, может быть больше или меньше в зависимости от частоты электромагнитного поля.

Выводы

На основе решений прямых задач исследована структура аномального электромагнитного поля, сформированного усталостной трещиной в электропроводящем материале. Показано, что составляющая рассеяния электромагнитной волны областью структурно неоднородного материала в окрестности трещины может многократно превосходить составляющую дифракции на границах трещины. Аномальное поле локальной электропроводящей неоднородности в приповерхностном слое основного материала зависит от частоты электромагнитного поля и может достигать нескольких процентов от уровня первичного поля. Это позволяет эффективно использовать вихретоковый метод контроля для исследования процесса зарождения и развития усталостной трещины в конструкционных материалах.

В формировании аномального поля усталостной трещины преобладает влияние структурной неоднородности материала в окрестности трещины. Поэтому выбор параметров эталонного искусственного дефекта типа трещины (по ширине и глубине), сигнал от которого используют для установки браковочного уровня в аппаратуре при вихретоковом контроле конкретного изделия, дол-

жен основываться на учете условий образования трещины в процессе эксплуатации данного изделия и не может быть унифицирован для широкой номенклатуры изделий.

1. Панасюк В. В. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, З. Т. Назарчук. – К.: Наукова думка, 1984.– 344 с.
2. Назарчук З. Т. Численное исследование дифракции волн на цилиндрических структурах / З. Т. Назарчук. – К.: Наукова думка, 1989.– 254 с.
3. Романив О. Н. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т; под общ. ред. В. В. Панасюка: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин [и др.]. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів: в 9-ти т.; під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін [та ін.]; під ред. О. П. Осташа, В. М. Федірка. – Львів: Сполом, 2007.–1068 с.
5. О контроле усталостного ресурса изделий электромагнитным методом / А. Я. Тетерко, В. И. Ткачев, В. И. Витицкий [и др.]. // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 1. – С. 93–95.
6. Осташ О. П. Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій / О. П. Осташ, А. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2006.–№ 4. – С. 5–16.
7. Nesterenko G. I. Ensuring structural damage of Russian aircraft / G. I. Nesterenko, B. G. Nesterenko // Int. J. Fatigue. – 2009. – 31. – P. 1054–1061.
8. Осташ О. П. Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О. П. Осташ // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 1. – С. 18–27.
9. Когут Н. С. Трещиностойкость конструкционных материалов / Н. С. Когут. – Львов: Вища школа, 1986. – 158 с.
10. Руководящий документ РД 32 150-2000. МПС РФ. Вихретоковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. – М., 2000. – 35 с.
11. Неразрушающий контроль. Справ. в 8 т. – Т. 2. Вихретоковый контроль. Кн. 2; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
12. Назарчук З. Т. Аналіз електромагнітного поля під поверхневої тріщини за розв'язком інтегрального рівняння / З. Т. Назарчук, А. Я. Тетерко, В. І. Гутник // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – № 5. – С. 69–74.
13. Тетерко А. Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А. Я. Тетерко, З. Т. Назарчук. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.

Based on solution of problems for anomalous electromagnetic field of extended thin crack and cylindrical inclusion with an arbitrary value of specific electric conductivity, it was shown that for a fatigue crack the component of field scattering by the region of structurally changed material in the vicinity of the crack can be many times higher than the component of diffraction field on crack borders, and depends on characteristics of this region. Therefore, at eddy current testing of an item, setting the rejection level by the signal from reference artificial crack should be based on allowing for physico-chemical conditions of crack formation in service of this item.

Keywords: eddy current testing, fatigue crack, specific electric conductivity, anomalous electromagnetic field

Поступила в редакцию
20.06.2016