Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLI., № 1, 1988

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. Г. СТАКЯН, А. С. МНАЦАКАНЯН, М. Ж. ЕГИНЯН

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Характерные особенности разрушения деталей машин чаще всего устанавливаются изучением кинетики развития трещин и строения поверхности излома. В связи с этим представляет интерес изучение и систематизация особенностей строения изломов, присущих основным видам периодического нагружения при линейном и сложном напряженном состояниях [1]. В последнее время уделяется значительное внимание оценке параметра вязкого разрушения K_{fc}, т. к. по ряду причин этот вопрос представляет значительный практический интерес. Для образцов цилиндрической формы, наиболее распространенных при испытаниях на усталость круговым изгибом, вязкость разрушения определяется согласно зависимости [2], являющейся общей в линейной механике разрушения:

$$K_{fc} = A\sigma^{бр}\sqrt{\pi a_f}, \qquad (1)$$

где $\sigma^{бр}$ — амплитуда действующих напряжений для сечения „брутто"; a_f — глубина кольцевой трещины, определяемая фрактографическим методом; $A \approx 1{,}12$ — коэффициент, зависящий от формы трещины.

При испытаниях на малоцикловую усталость, характерных меньшими значениями a_f, практически не меняющими момент сопротивления опасного сечения детали, использование зависимости (1) в методическом плане оправдано. Но оценка K_{fc} в области многоцикловой усталости имеет определенные недостатки. Особенности развития кольцевой трещины при разных уровнях перенапряжений, сложная конфигурация и вариация расположения зоны долома приводят к изменению значений $\sigma^{бр}$ и a_f и следовательно-приближенному определению величины коэффициента K_{fc}. Наличие опробированных методик для определения действующих напряжений избавило бы от применения сложных механических операций по созданию регламентированных трещин, а также от проведения дополнительных испытаний для определения компонентов напряженного состояния в зоне трещины.

В настоящей работе сделан анализ методов определения характеристик трещиностойкости материалов, уточнены реальные условия переменного напряженного состояния при круговом изгибе круглых образцов и определены амплитудные значения действующих напряжений с учетом кинетики развития трещин.

В работе [3] подробно описан процесс возникновения и развития кольцевых трещин и даны основные формы и характер расположения

зоны долома при круговом изгибе. В [1] определены геометрические характеристики опасного сечения образца, ослабленного трещиной, и действующие номинальные напряжения с учетом смыкания трещины в зоне сжатия опасного сечения. Но при этом не учтены реальные условия периодического нагружения и характер изменения «живого сечения».

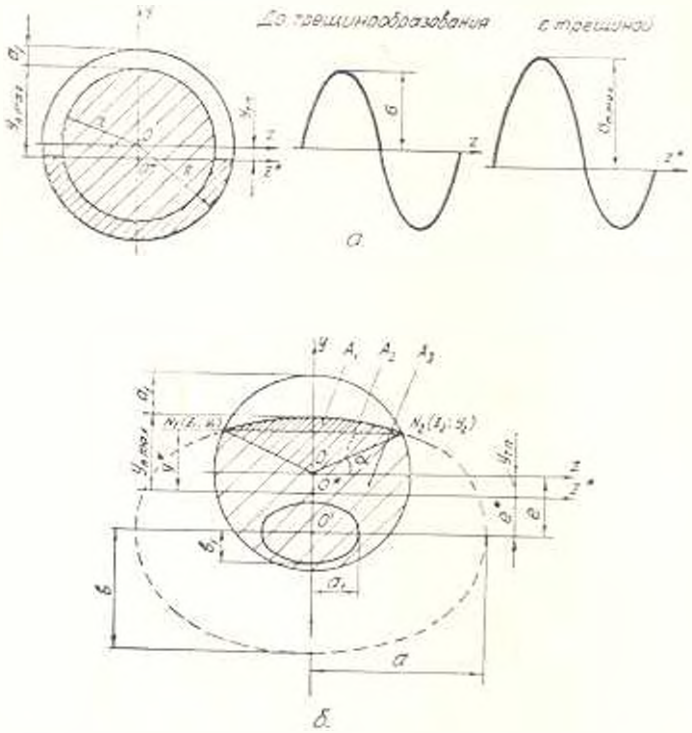

Рис. 1. Расчетные схемы развития кольцевой трещины при: а — симметричном доломе; б — асимметричном доломе.

Используя данные [1], можно считать, что при круговом изгибе развитие круговой трещины при высоких перенапряжениях приводит к концентричному сужению «живого сечения» и образованию круговой зоны долома, а при низких перенапряжениях — несимметричному сужению и эллиптической зоне долома (рис. 1), предполагая, что точка O' в процессе развития трещины остается неизменной. Это связано с тем, что при высоких перенапряжениях кольцевая трещина возникает одновременно и равномерно распространяется по всему периметру опасного сечения, а при низких — преимущественно в наиболее слабых и неблагоприятно сориентированных к нагрузке зернах металла, в поверхностных слоях детали. Во втором случае скорость развития трещины неравномерная — она выше на участках образовавшейся трещины при ее прохождении через зону растяжения, а долом происходит при таком расположении ослабленного сечения к действующей нагрузке,

когда момент сопротивления минимальный. По мере развития неравномерной кольцевой трещины помимо уменьшения напряженного состояния возникает также асимметрия цикла напряжений. Из этого следует, что в интервале перенапряжений $\sigma_{-1} \leqslant \sigma \leqslant \sigma_{-1r}$ существует граничный уровень σ_r, при котором симметричный круговой долом переходит к асимметричному эллиптическому (σ_{-1r} и σ_{-1} — пределы выносливости при мало- и многоцикловой усталости). При определении максимальных растягивающих напряжений, ответственных за развитие трещины, для обоих расчетных случаев следует учесть смыкание трещины в зоне сжатия, смещающее центр тяжести O^* и повышающее момент сопротивления опасного сечения. Тогда

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_{z^*}} y_{max}, \qquad (2)$$

где $y_{max} = y_{z^*} + r$; $r = R - a$; y_{z^*} — смещение нейтральной оси z^*; I_{z^*} — момент инерции „живого сечения" относительно z^*.

Значения y_{max} и I_{z^*} с момента появления кольцевой микротрещины до окончательного разрушения непрерывно варьируют, в связи с чем напряжения σ_{max} являются функциями от a_j: $y_{max} = f_1(a_j)$, $I_{z^*} = f_2(a_j)$, $\sigma_{max} = f_3(a_j)$.

Для первого случая из-за постоянства формы „живого сечения" значения σ_{max} можно определить для любого момента поворота сечения, а для второго случая этот момент наступает при симметричном расположении ослабленной части сечения относительно оси y, в зоне растяжения. Такое расположение эллиптической трещины относительно круглого сечения, характеризуемое точками $N_1(z_1; y_1)$ и $N_2(z_2; y_2)$ (рис. 1б), можно определить из совместного решения уравнения системы:

$$\begin{cases} z^2 + (y - e)^2 = R^2; \\ \dfrac{z^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} = 1, \end{cases}$$

где e — эксцентриситет, а значения полуосей эллипса долома можно выразить, исходя из [illegible] эллиптической трещины: $\frac{a}{b} = \frac{a_1}{b_1} = k$ (k и k зависят от уровня перенапряжения и определяются экспериментально).

Значения y_{z^*} равны:

а) для первого случая (рис. 1а) —

$$y_{z^*} = \frac{y_t (R^2 - r^2)}{R^2 + r^2}, \qquad (3)$$

где $y_t = \frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r}$ — координата центра тяжести полукольца;

б) для второго случая (рис. 1б)—

$$y_{тт} = \frac{\sum_{i=1}^{3} A_i Y_i}{\sum_{i=1}^{3} A_i}, \tag{4}$$

где A_i, Y_i — соответственно площадь и координаты центра тяжести составных частей „живого сечения" (на рис. 1б они указаны разной штриховкой):

$$A_1 = \frac{\pi R^2 \beta}{360}, \quad \beta = (180^\circ - 2\alpha), \quad \alpha = \arcsin \frac{y_1 - e}{R};$$

$$A_2 = z_2 y_1;$$

$$A_3 = \int_{z_1}^{z_2} (y - y_1)\, dz, \quad y = k\sqrt{a^2 - z^2},$$

откуда

$$A_3 = \frac{a^2}{2}(\xi_2 - \xi_1) - \frac{a^2}{4}(\sin^2 \xi_2 - \sin^2 \xi_1) - z_2 y_1,$$

где $\xi_1 = \arccos \frac{z_1}{a}$, $\xi_2 = \arccos \frac{z_2}{a}$;

$$Y_1 = \frac{4}{3} R \frac{180}{\pi\beta} \sin \beta; \quad Y_2 = \frac{2}{3}(y_1 - e); \quad Y_3 = \frac{S_1}{A_3}; \quad S_3 = \frac{k}{3}(b^2 - y^2)^{3/2}.$$

Момент инерции «живого сечения»:

а) для первого случая-

$$I_{жт} = \frac{\pi R^4}{4} + \pi R^2 y_{тт}^2 - \left| 0{,}11 (R^4 - r^4) - 0{,}28 R^4 r^4 \frac{R - r}{R + r} + \right.$$

$$\left. + \frac{\pi}{2}(R^2 - r^2)\left(\frac{4}{3\pi} \frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r} + y_{тт}\right)^2 \right|; \tag{5}$$

б) для второго случая-

$$I_{жт} = \sum_{i=1}^{3} I_{жтi}, \tag{6}$$

где

$$I_{жт1} = \frac{R^4}{8}\left| \frac{\pi\beta}{180^\circ} + \sin\beta - \frac{64}{9}\frac{180^\circ}{\pi\beta}\sin^2\frac{\beta}{2} \right| + A_1(V_0 - y_{тт})^2,$$

$$V_0 = \frac{4}{3} R \frac{180}{\pi\beta} \sin\frac{\beta}{2};$$

$$I_{жт2} = \frac{z_2}{18} y_1^3 + A_2\left(\frac{2}{3} y_1 + y_{тт}\right)^2;$$

$$I_{zn_z} = \int_{A_z} y^2 dA = \iint y^2 dz\,dy = \int_{z_1}^{z_2} \left(\int_{y^*}^{b\sqrt{1-\frac{z_2^2}{a^2}}-e^*} y^2 dy \right) dz,$$

который после несложных преобразований принимает вид:

$$I_{zn3} = \frac{2}{3}\left[b^3 a \left(\frac{3}{8} \arcsin \frac{z_2}{a} + \frac{z_2}{2a}\sqrt{1-\frac{z_2^2}{a^2}} + \right.\right.$$

$$+ \frac{z_2}{2a}\sqrt{\left(1-\frac{z_2^2}{a^2}\right)\left(1-\frac{4z_2^2}{a^2}+\frac{4z_2^4}{a^4}\right)}\Bigg) + b^3 e^* \left(\frac{z_2^3}{a^2} - 3z_2\right) +$$

$$\left. + \frac{3abe^{*2}}{2}\left(\arcsin \frac{z_2}{a} + \frac{1}{2}\sin\left(2\arcsin\frac{z_2}{a}\right)\right) - e^{*3} z_2 - y^{*3} z_2 \right],$$

где $e^* = e - y_{тп}$; $y^* = y_1 - e^*$.

Для облегчения выполнения громоздких вычислительных процедур и полного охвата спектра значений параметров, рассчитанных согласно (2)—(6), составлена программа на ЭВМ, блок-схема которой представлена на рис. 2. Использованы результаты испытаний на усталость [5] (валы $d = 20$ *мм* с V-образным контурным надрезом $\rho = 0{,}2$ мм из стали 45 в нормализованном состоянии: $\sigma_в = 670$ *МПа*, $\sigma_т = 420$ *МПа*, $\bar{\sigma}_{-1} = 152$ *МПа*) и проведен фрактографический анализ изломов на разных уровнях перенапряжений, охватывающих оба расчетных случая (рис. 1).

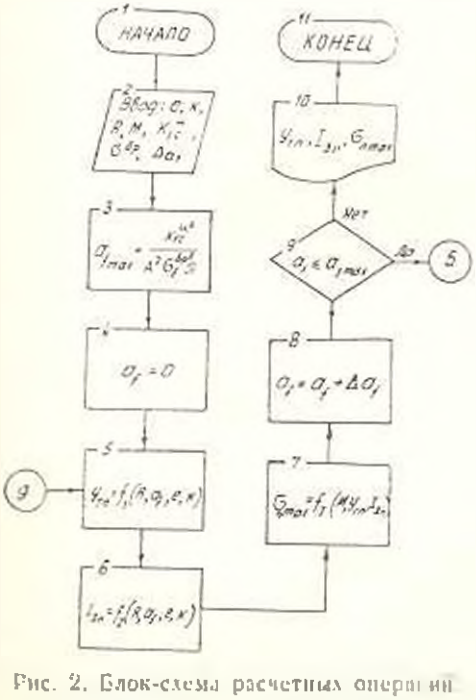

Рис. 2. Блок-схема расчетных операций

Первоначально, принимая K_{fc} как физическую постоянную для выбранного материала [1] и имея значения σ^{cr}, согласно [1] определяют a_f, сравнивают с экспериментальными данными, полученными из фрактографического анализа, и корректируют значения коэффициента A. Затем шаговым методом, начиная со значения $a_f = 0$, через каждые $\Delta a_f = 10^{-4}$ м вычисляют значения y_{max}, I_{2s} и σ_{max} до окончательного разрушения.

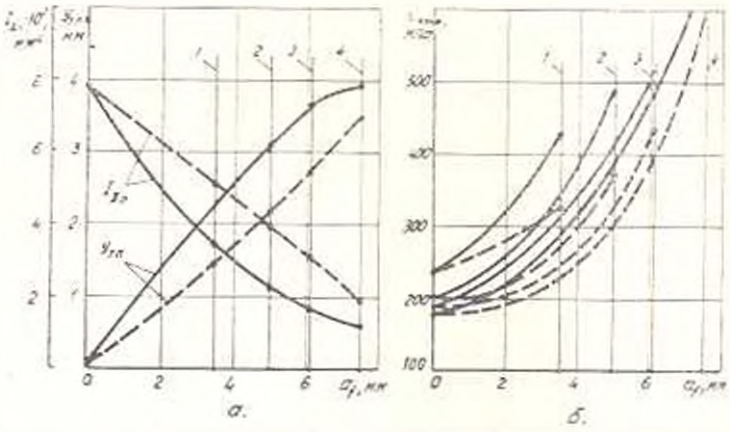

Рис. 3. Графики зависимостей $y_{max} = f_1(a_f)$, $I_{2s} = f_2(a_f)$ и $\sigma_{max} = f_3(a_f)$ при: ——— симметричном доломе; — — — асимметричном доломе. Уровни 1, 2, 3, 4 соответствуют критической глубине кольцевой трещины при $\sigma^{cr} = 240$, 230, 180 и 160 *МПа*.

Результаты вычислений представлены на рис. 3. Изменение геометрических характеристик сечения менее благоприятно для случая симметричного долома, где эффект смыкания трещины проявляется в меньшей степени, чем для второго случая. При асимметричном доломе закон изменения y_{max} и I_{2s} близок к прямолинейному и лишь при больших значениях a_f наблюдается сближение рассмотренных величин. Это и предопределяет характер изменения напряжений σ_{max} от глубины кольцевой трещины (рис. 3б); значения и градиент изменения σ_{max} выше для случая симметричного долома, хотя их разность в момент разрушения для рассмотренных расчетных схем с увеличением a_f постепенно уменьшается.

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что в зависимости от критической глубины трещины значения σ_{max} превосходят напряжения для сечения „брутто" σ^{cr} в (1,3 — 3) раза, что должно быть учтено при определении величины параметра вязкого разрушения K_{fc}.

Каф. физ. ЛПИ им. К. Маркса

21. IX. 1986

Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ս. Ա. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ս. Լ. ՄԱԿ

ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻՈՆ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻՑ ՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾ ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ՀԱԶԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Ցույց է տրված, որ պտտական ծռմամբ հոգնածային փորձարկումների ընթացքում մեքենամասերի «կենդանի» հատվածքի անընդհատ փոքրացման պատճառով մածուցիկ քայքայման պարամետրի որոշումը բազմացիկլային հոգնածության տիրույթում կրում է պայմանական բնույթ. Առանձնացված են մեքենամասերի քայքայման բնույթի երկու հաշվարկային դեպքեր և նրանց համար ստացված են առնչություններ հատվածքի չեզոք առանցքի տեղաշարժման, իներցիայի մոմենտի և առավելագույն անվանական լարումների որոշման համար՝ կախված օղակաձև ճաքի խորությունից և հաշվի առնելով ճաքի փակվելը սեղմման գոտում։

Խնդիրը լուծված է ԷՀՄ-ի միջոցով։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Стакян М. Г., Григорян С. А.* О строении типичных усталостных изломов деталей машин //Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1974.—Т. XXVII, № 6.—С. 10—14.
2. *Трощенко В. Т.* Циклические деформации и усталость металлов. Т. 1.—Киев: Наукова думка, 1985.—224 с.
3. *Кудрявцев П. И.* Особенности кинетики роста трещин малоцикловой усталости и стали при повышенной температуре //Механическая усталость металлов: Мат. VI Междунар. колл.—Киев: Наукова думка, 1983.—С. 293—296.
4. *Мостовой А. С., Дубовицкий С. В.* О влиянии усталостной трещины на характеристики циклов напряжений// Тр. КуАИ.—1971.—Вып. 39.—С. 41—52.
5. *Мак С. Л., Гаспирян С. А., Стакян М. Г.* О строении изломов образцов, испытанных при нагружении их циклическим изгибом и статическим кручением// Детали машин: Респуб. межвед. науч.-тех. сб.—Киев: Техника, 1971.—Вып. 13.—С. 88—91.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLI, № 1, 1988

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. Х. ЗАХАРЯН, С. А. ГАСПАРЯН

ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ С СОКРАЩЕННОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ

Общая длительность усталостных испытаний с характерным рассеянием определяется преимущественно образцами с большей долговечностью. Значительную экономию машинного времени, следовательно и соответствующих статей затрат можно получить, если исключить последние из опытов. Этого можно добиться, если проводить эксперимент одновременно над группой исследуемых объектов, прекращая его с разрушением наислабейшего звена.