

УДК 539.4(075):620.178.3

Д. С. Добровольский, магистрант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С КОЛЬЦЕВЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Модернизирована установка для малоцикловых испытаний образцов и модельных элементов при изгибе с вращением с целью выращивания кольцевых трещин. Рекомендован метод расчета кривых малоцикловой усталости при изгибе с вращением образцов и модельных элементов для получения кольцевых трещин необходимой глубины. На основе ранее полученных решений для определения коэффициентов интенсивности напряжений предложена методика экспериментального определения трещиностойкости образцов и элементов конструкций с кольцевыми трещинами в условиях изгиба с вращением, растяжения или кручения.

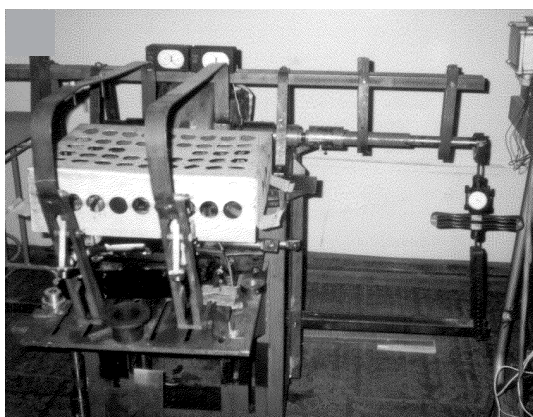
Ключевые слова: модернизация установки, расчет кривых малоцикловой усталости, получение кольцевых трещин, экспериментальная методика.

Кольцевые трещины возникают в выточках, резьбах, переходах диаметров при переменном растяжении стержней, изгибе с вращением и кручении валов, других деталей и являются причиной их разрушения.

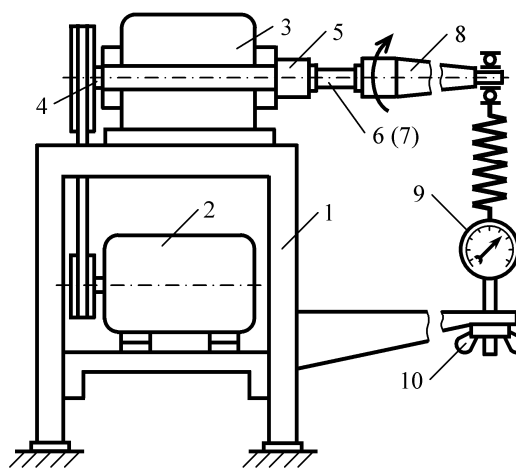
В соответствии с [1] трещиностойкость (вязкость разрушения) материалов при статическом нагружении определяют на образцах с предварительно выращенными малыми ($\sim 1...2$ мм) трещинами. При ограниченной пластичности материалов, небольших запасах прочности и высоких рабочих напряжениях такие трещины могут служить причиной разрушения элементов конструкций. В условиях высоких запасов циклической или длительной прочности и низких рабочих напряжений происходит постепенное развитие малых трещин и их превращение в глубокие. Когда сочетание постепенно растущих рабочих напряжений и размеров трещин становится критическим, происходит разрушение элементов конструкций. Вместе с этим исследованием вязкости разрушения в условиях глубоких кольцевых трещин выполнено недостаточно. В связи с этим в данной работе предлагается методика экспериментального определения трещиностойкости материалов и элементов конструкций в условиях изгиба с вращением,

растяжения или кручения в широком диапазоне размеров кольцевых трещин.

При определении трещиностойкости предварительное выращивание кольцевых трещин необходимых размеров в образцах или модельных элементах круглого сечения целесообразно проводить в условиях малоциклового нагружения при изгибе с вращением. С этой целью модернизирована оригинальная установка [2] (рис. 1), которая состоит из рамы 1, электродвигателя 2, редуктора 3 с ведущим валом 4 и тихоходным валом 5, содержащим захват для гладкого образца 6 или модельного элемента 7 с кольцевым V-образным надрезом. Малоцикловое нагружение с частотой 8 цикл./мин. осуществляется с помощью удлинителя 8, образцового динамометра 9 и нагружающего устройства 10. При малоцикловых испытаниях задаются амплитуды изгибающего момента и с помощью установленных счетчиков фиксируются: N_T – числа циклов до появления первой трещины длиной 0,5...0,8 мм; $[N]$ – допускаемые числа циклов до образования кольцевой трещины необходимой глубины; N – числа циклов до разрушения образца или модельного элемента.



а



б

Рис. 1. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) установки для малоцикловых испытаний при изгибе с вращением образцов и модельных элементов

Визуально наблюдать рост глубины кольцевых трещин в процессе малоцикловых испытаний невозможно. Для получения трещины необходимой глубины рекомендуется использовать кривую малоциклового усталости (МЦУ) материала. Систематическими экспериментами С. С. Мэнсона [3], других авторов [4] показано, что для большинства сталей кривая МЦУ при симметричном цикле отсекает на оси ординат ($N = 1$) отрезок $\sigma_a \approx 1,75\sigma_b$, где σ_a – амплитуда напряжения; σ_b – предел прочности материала. Обобщением многих экспериментальных данных по МЦУ сталей при симметричном изгибе установлено [5], что при долговечности $N = 10^5$ циклов значение амплитуды напряжения $\sigma_a \approx 0,63\sigma_b$. С учетом этого можно представить кривую МЦУ сталей по разрушению (рис. 2, а)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_b} = 1,75 - 0,224 \lg N. \quad (1)$$

Долговечности сталей по разрушению N и трещинообразованию N_T при МЦУ взаимосвязаны [6]:

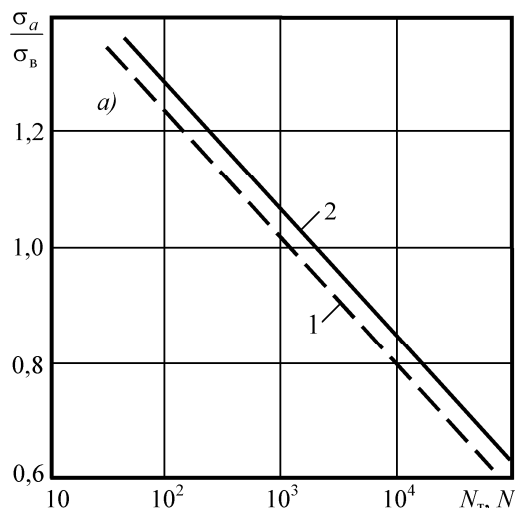


Рис. 2. Расчетные кривые МЦУ при изгибе с вращением сталей (а) и модельных элементов (б) с надрезом (сталь 45; $\sigma_b = 675$ МПа; $\alpha_\sigma = 2,63$) по трещинообразованию (1) и разрушению (2)

Для стали 45 при $\sigma_b = 675$ МПа параметр $b = 760$. Располагая $q_{\sigma N}$ и кривой МЦУ материала, можно вычислить эффективный коэффициент концентрации напряжений:

$$k_{\sigma N} = 1 + q_{\sigma N}(\alpha_\sigma - 1) \quad (5)$$

и амплитуду номинальных напряжений для модельного элемента при рассматриваемой долговечности N :

$$\sigma_{ан} = \sigma_a / k_{\sigma N}. \quad (6)$$

На рис. 2, б представлена полученная по формулам (1), (4)–(6) кривая МЦУ по разрушению для модельного элемента.

Как показал факторный (T °С, α_σ) анализ [8], долговечности модельных элементов при МЦУ по трещинообразованию N_T и разрушению N взаимосвязаны. При температуре испытаний $T = 20$ °С и коэффициенте концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,63$ получаем:

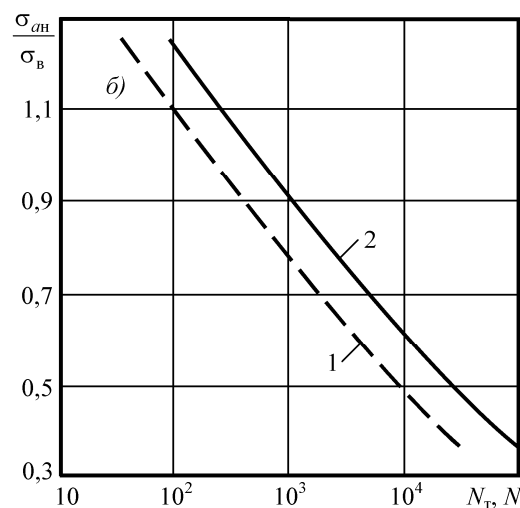
$$N = 1,84 N_T^{0,996}, \quad (2)$$

что позволяет с учетом формулы (1) получить кривую МЦУ сталей по трещинообразованию (рис. 2, а):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_b} = 1,691 - 0,223 \lg N_T. \quad (3)$$

Для получения кольцевой трещины необходимой глубины в модельных элементах выполняется расчет соответствующих кривых МЦУ при изгибе с вращением. В качестве примера такой расчет выполнен для модельного элемента стали 45 ($\sigma_b = 675$ МПа) с V-образным кольцевым надрезом и коэффициентом концентрации напряжений при изгибе $\alpha_\sigma = 2,63$ [7]. В соответствии с рекомендациями Р. Б. Хейвуда чувствительность сталей к концентрации напряжений при рассматриваемой долговечности N определяется по формуле:

$$q_{\sigma N} = \frac{(\lg N)^4}{b + (\lg N)^4}. \quad (4)$$



$$N_T = 0,373 N^{1,008}. \quad (7)$$

Используя рассчитанную выше кривую МЦУ по разрушению, строим с учетом формулы (7) кривую МЦУ модельного элемента по трещинообразованию (рис. 2, б).

Определение трещиностойкости целесообразно начинать в условиях изгиба с вращением. Для этого, используя кривые МЦУ (рис. 2), с помощью нагружающего устройства 10 (рис. 1) задается необходимый изгибающий момент, а испытуемый образец или модельный элемент доводится до разрушения. При определении трещиностойкости в условиях растяжения или кручения допустимое число циклов $[N]$ для выращивания трещины необходимой глубины назначается как с учетом расчетных кривых МЦУ, так и полученных результатов малоцикловых разрушений при изгибе с вращением образцов или модельных элементов. После испытания измеряется диа-

метр зоны окончательного разрушения и критическая глубина трещины. Затем по формулам сопротивления материалов вычисляются критические напряжения в нетто-сечении. Далее по ранее полученным решениям [9] находятся критические коэффициенты интенсивности напряжений в условиях изгиба с вращением, растяжения или кручения, характеризующие трещиностойкость элементов конструкций в исследуемом диапазоне размеров кольцевых трещин.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
2. Авт. св. 953514 (СССР). Установка для малоцикловых испытаний образцов материалов / Добровольский В. И. – Оpubл. в Б. И., 1982, № 31.
3. Мэнсон С. С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1974. – 344 с.
4. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Деформационные методы оценки малоцикловой прочности. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 402 с.
5. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости : пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
6. Добровольский С. В., Добровольский В. И. Закономерности подобия малоциклового разрушения модели и детали. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 243 с.
7. Добровольский В. И., Кучерявый Б. П., Пряхин В. В. Руководящий технический материал РТМЗ-1637-84. Материалы для штампов. Методы определения прочности при механической малоцикловой усталости. – Введ. впервые 01.01.85. – М. : Стандарты, 1984. – 60 с.
8. Добровольский В. И., Добровольский С. В., Пряхин В. В. Факторный анализ малоцикловой долговечности элементов конструкций по трещинообразованию и разрушению // Физ.-хим. механика материалов. – 1998. – № 6. – С. 121–123.
9. Добровольский Д. С. Коэффициенты интенсивности напряжений для цилиндрического образца с кольцевой трещиной // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 6. – С. 57–59.

D. S. Dobrovolsky, Master's degree student, Kalashnikov ISTU

Method for determination of crack resistance of structural elements with annular cracks

The machine for low-cycle tests of samples and model elements in bending with rotation for the purpose of cultivation annular cracks has been upgraded. A method for calculation of the curves of low cycle fatigue in bending with rotation samples and model elements to obtain the required depth of annular cracks has been recommended. On the basis of previously obtained solutions for the determination of stress intensity factors, a method has been proposed for experimental determination of crack resistance of samples and structural elements with annular cracks under bending with rotation, stretching or torsion.

Keywords: upgrade of machine, calculation of low-cycle fatigue curves, obtaining annular cracks, experimental technique.

Получено: 19.05.16