

УДК 539.4(075): 620.178.3

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С КОЛЬЦЕВЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Для совершенствования методов оценки качества материалов, машин и конструкций в итоговой работе [1] в связи с 80-летием журнала рекомендован комплекс критериев прочности и разрушения в виде восьмиуровневой пирамиды обеспечения работоспособности объектов техносферы. Указаны ориентировочно годы реализации уровней: прочность (1900), жесткость и устойчивость (1920), ресурс (1940), надежность (1960), живучесть (1980), безопасность (1990), риск (2010), защищенность потенциально опасных объектов (2020).

В связи с интенсивным развитием механики трещин в последние десятилетия важное значение приобретают разработки методов оценки живучести материалов и несущих элементов с целью возможного продления ресурса безопасной эксплуатации конструкций [2]. Для определения живучести сталей (гладких образцов) С. С. Мэнсон предложил формулу [3]

$$L = N - N_T = 2,50N_T^{0,67}, \quad (1)$$

где  $N$  и  $N_T$  – числа циклов до разрушения и появления трещин длиной 0,5...0,8 мм.

Взаимосвязь долговечностей по трещинообразованию и разрушению гладких образцов получена Н. А. Махутовым [4]:

$$N_T = 0,513N^{1,04}. \quad (2)$$

Удобная (для прогнозирования долговечности и живучести элементов конструкций) аппроксимирующая модель принята в работе [5]:

$$N = C_{\text{ат}} N_T^{m_{\text{ат}}}. \quad (3)$$

В результате факторного (коэффициент концентрации энергии деформирования в вершине надреза  $\alpha_u$ , рабочая температура  $T$  °С) машинного регрессионного анализа результатов проведенных усталостных испытаний плоских модельных элементов с V-образными надрезами при симметричном изгибе получены зависимости для определения параметров модели (3):

$$C_{\text{ат}} = 1,25 + 0,538\sqrt{\alpha_u} + 2,58 \cdot 10^{-3}T + 1,36 \cdot 10^{-3}T\sqrt{\alpha_u}; \quad (4)$$

$$m_{\text{ат}} = 0,998 - 2,33 \cdot 10^{-3}\sqrt{\alpha_u} - 1,90 \cdot 10^{-4}T + 2,98 \cdot 10^{-5}T\sqrt{\alpha_u}; \quad (5)$$

$$\alpha_u = (1 - \mu^2)\alpha_\sigma^2 + \mu^2,$$

где  $\alpha_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений в вершине надреза;  $\mu \approx 0,3$  – коэффициент Пуассона.

В частности, для рассматриваемых далее модельных элементов круглого сечения с V-образным кольцевым надрезом при  $\alpha_\sigma = 2,63$  [6] и  $\alpha_u = 6,38$  с учетом формул (3)–(5) получаем

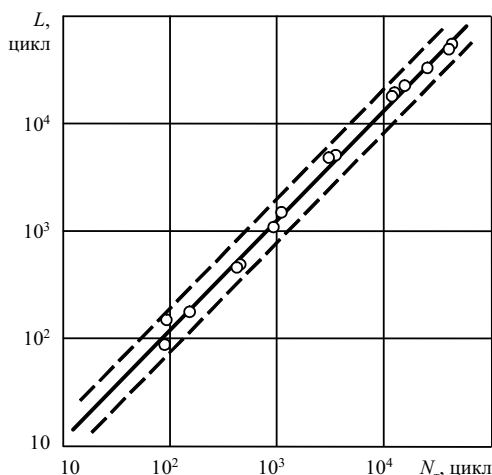
$$N = 2,73N_T^{0,990}, \quad N_T = 0,363N^{1,01}, \quad L = 1,73N_T^{0,984}. \quad (6)$$

Вместе с тем исследований живучести элементов конструкций с кольцевыми трещинами выполнено недостаточно. В связи с этим в данной работе излагаются результаты экспериментальной оценки живучести при изгибе с вращением модельных элементов круглого сечения (длиной 200 мм,  $D = 40$  мм,  $d = 20$  мм) с кольцевым V-образным надрезом радиусом в вершине  $\rho = 1$  мм, изготовленных из стали 45 ( $\sigma_T = 480$  МПа;  $\sigma_B = 675$  МПа;  $\delta = 6,7\%$ ;  $\psi = 46,2\%$ ).

Усталостные испытания модельных элементов при изгибе с вращением проводились с частотой 8 цикл/мин на модернизированной установке по разработанной методике [7]. С помощью нагружающего устройства задавалась соответствующая прогнозируемой долговечности амплитуда номинально упругих напряжений  $\sigma_{\text{нб}}$ , МПа (см. табл.). Визуально с помощью лупы и счетчика фиксировалось число циклов  $N_T$  до образования в вершине надреза трещины длиной 0,5...0,8 мм, а также число циклов  $N$  до окончательного разрушения. Результаты экспериментальной оценки живучести модельных элементов ( $n = 15$ ) приведены в таблице и представлены на рисунке в виде точек.

### Результаты усталостных испытаний модельных элементов (МЭ)

№ МЭ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\sigma_{\text{нб}}$	821	811	755	689	689	544	542	424	424	325	325	309	275	243	243
$N_T$	90	95	150	424	441	960	1070	3100	3400	12500	12000	15500	25000	41000	42500
$N$	178	244	330	870	903	2036	2563	7761	8520	31720	30573	37374	57215	89779	95310
$L$	88	149	180	446	462	1076	1493	4661	5120	19220	18573	21874	32215	48779	52810



Зависимость живучести МЭ от числа циклов до трещинообразования: ○ – эксперимент; — – вероятность 50 %; - - - поле рассеивания результатов эксперимента с вероятностью 99,7 %

Для установления корреляционной связи между живучестью  $L$  и долговечностью  $N_T$  полученные данные подвергались статистической обработке по рекомендуемой методике [8]. С учетом представленных на рисунке экспериментальных данных для уравнения регрессии принята степенная зависимость

$$L = C_L N_T^{m_L}, \quad (7)$$

где  $m_L$ ,  $C_L$  – параметры, определяемые в результате машинного регрессионного анализа по составленной программе в системе компьютерной алгебры Mathcad.

Основные этапы статобработки следующие: средние значения логарифмов долговечности  $\bar{x} = \sum \lg N_{Ti} / n = 3,361326$  и живучести  $\bar{y} = \sum \lg L_i / n = 3,472141$ ; средние квадратические отклонения логарифмов долговечности  $\sigma_x = \sqrt{\sum (\lg N_{Ti})^2 / n - (\bar{x})^2} = 0,918012$  и живучести  $\sigma_y = \sqrt{\sum (\lg L_i)^2 / n - (\bar{y})^2} = 0,944136$ ; смешанный центральный момент первого порядка  $\mu_{11} = \sum (\lg N_{Ti})(\lg L_i) = 0,864815$ ; коэффициент корреляции  $r = \mu_{11} / \sigma_x \sigma_y = 0,997793$ ; показатель степени  $m_L = \mu_{11} / \sigma_x^2 = 1,026187$ ; значение постоян-

ной  $C_L = 1,053879$ . Полученное уравнение регрессии для 50 % вероятности

$$L = 1,054 N_T^{1,026} \quad (8)$$

нанесено на рисунок сплошной линией. Далее вычисляли тройную меру средней квадратической погрешности  $3\bar{\sigma}_x = 0,182869$ , характеризующую поле рассеивания эксперимента с вероятностью 99,7 %, и наносили на рисунок в виде штриховых линий.

Анализ показал, что формулы (1) и (2), предложенные для гладких образцов, непригодны для расчета живучести исследуемых модельных элементов. Применение зависимости (6), полученной для плоского симметричного изгиба, завышает (от 16 до 40 %) расчетную живучесть при изгибе с вращением модельных элементов по сравнению с экспериментальными данными. Для более надежного прогноза живучести валов с кольцевыми трещинами при изгибе с вращением рекомендуется использовать уравнение регрессии (8).

### Библиографические ссылки

1. Махутов Н. А. Базовые характеристики конструкционных материалов при комплексной оценке прочности, ресурса и живучести опасных объектов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 1. – С. 62–70.
2. Морозов Е. М. Зрелый возраст журнала // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 1. – С. 61–62.
3. Manson S. S. Fatigue Complex Subject // Experimental Mechanics. – 1965. – No. 7. – P. 237–248.
4. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
5. Добровольский В. И., Добровольский С. В., Пряхин В. В. Факторный анализ малоциклового долговечности элементов конструкций по трещинообразованию и разрушению // Физ.-хим. механика материалов. – 1998. – № 6. – С. 121–123.
6. Добровольский В. И., Кучерявый Б. П., Пряхин В. В. Руководящий технический материал РТМЗ-1637-84. Материалы для штампов. Методы определения прочности при механической малоциклового усталости. – Введ. впервые 01.01.85. – М.: Стандарты, 1984. – 60 с.
7. Добровольский Д. С. Методика определения трещиностойкости элементов конструкций с кольцевыми трещинами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2. – С. 64–66.
8. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М.: Физматгиз, 1981. – 356 с.