

МАШИНОСТРОЕНИЕ

С. А. ГАСПАРЯН, С. А. МАК

К РАСЧЕТУ ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

В расчетной практике пределы выносливости стали при нестационарных режимах нагружения как в области циклов ограниченной, так и длительной выносливости, определяются вторичными кривыми выносливости, построенными в координатах: действующее в спектре максимальное напряжение — число циклов изменения напряжения. Такой путь определения выносливости требует осуществления трудоемких и дорогостоящих испытаний при заданных или типовых режимах нагружения. В связи с этим возникает необходимость изыскания расчетных методов учета влияния нестационарности нагружения, обеспечивающих наибольшее соответствие расчетных значений предельных напряжений фактическим.

Ранее [1, 2] в качестве параметра оценки режима нагружения была предложена безразмерная величина S , равная площади фигуры кривой изменения амплитуды напряжения в спектре режима нагружения в относительных координатах. Если действующее в спектре максимальное напряжение и объем блока (число циклов варьирования амплитуды напряжения) условно принять за единицу, то упомянутая площадь, являющаяся частью площади единичного квадрата, соответствующего самому тяжелому режиму нагружения (стационарному), будет характеризовать степень загрузки материала при заданном режиме нагружения. Тогда недогрузка материала при заданном режиме будет:

$$Q = 1 - S.$$

Введение параметра S (или Q) ограничено условием разнородности объемов блока (спектра) при разных режимах нагружения. Это условие, однако, не влияет на величину Q , так как при разных объемах блоков суммарная площадь всех фигур под данной кривой изменения амплитуд при одинаковом базовом числе нагружений будет одинаковой.

Анализ результатов многочисленных испытаний стальных образцов при различных режимах нагружения позволил предположить, что существует линейная зависимость, связывающая длительный предел выносливости с интегральным параметром оценки режима нагружения Q [2]:

$$\sigma_{-1n} = \sigma_{-1} (Qq + 1), \quad (1)$$

где σ_{-1n} — длительный предел выносливости при программном нагружении, определяемый по вторичным кривым выносливости;
 σ_{-1} — длительный предел выносливости при стационарном нагружении, определяемый по исходной кривой выносливости;
 q — тангенс угла наклона кривых $\sigma_{-1n} = f(Q)$.

Однако, как показали некоторые исследования [3], при увеличении суммарного числа циклов сверх обычно принимаемого базового числа, намечается дальнейшее снижение вторичного предела выносливости. Рассматривая приведенные в литературе пределы выносливости при программном нагружении как пределы, соответствующие базовому числу циклов исходной кривой выносливости, и принимая во внимание, что длительный предел выносливости есть значение ординаты кривой $\sigma^m N = C$ при $N = N_0$, можно допустить, что зависимость $\sigma_{-1n} = f(Q)$ справедлива и для наклонных ветвей кривой выносливости. Это позволяет (1) представить в виде:

$$\sigma_{rn} = \sigma_r (Qq + 1), \quad (2)$$

где σ_{rn} и σ_r — пределы выносливости при программном и стационарном режимах нагружения в области циклов ограниченной выносливости.

Решая уравнения наклонных ветвей кривых выносливости (исходной и вторичной) относительно предела выносливости, представим их в логарифмическом виде:

$$\lg \sigma_{rn} = \frac{C_n - \lg N}{m_n}, \quad (3)$$

$$\lg \sigma_r = \frac{C - \lg N}{m}. \quad (4)$$

Перепишем зависимость (2) также в логарифмической форме:

$$\lg \sigma_{rn} = \lg \sigma_r + \lg (Qq + 1).$$

В силу (3) и (4), допуская [4, 5], что $m_n = m$, получим:

$$C_n = C + m \lg (Qq + 1). \quad (5)$$

Эта зависимость позволяет получить уравнение вторичной кривой выносливости по параметрам исходной кривой выносливости и режима нагружения Q при 50% вероятности неразрушения.

Как известно [6], уравнение семейства кривых выносливости при различной степени вероятности имеет вид:

$$\lg N = -[|m_{50}| + k_n S_m] (\lg \sigma - \lg \bar{\sigma}) + \lg N + k_p S_{Nr}, \quad (6)$$

где m_{50} — показатель наклона при 50% вероятности неразрушения;
 $\lg \sigma$, $\lg N$ — среднеевероятное значение логарифмов напряжения и долговечности;

S_m, S_{N_r} — основное отклонение показателя наклона и мера индивидуального рассеяния $\lg N$;

k_n — коэффициент вероятности неразрушения.

Обозначив

$$C^{(n)} = (\lg N + m_{50} \lg \sigma) + k_n (S_{N_r} + m_{50} S_m \lg \sigma), \quad (7)$$

уравнение (6) можно представить в виде:

$$\lg N = C^{(n)} - (m_{50} + k_n S_m) \lg \sigma. \quad (8)$$

Можно предполагать, что рассеяние результатов усталостных испытаний не зависит от режима нагружения. Тогда без ощутимой погрешности можно принять, что мера индивидуального рассеяния долговечности и основное отклонение показателя наклона одинаковы при программном и стационарном нагружении. Это дает основание разбить уравнение (5) для случая семейства кривых выносливости при программном нагружении, с учетом различной вероятности неразрушения:

$$C_n^{(n)} = C^{(n)} + (m_{50} + k_n S_m) \lg (Qq + 1). \quad (9)$$

Подставив значение $C_n^{(n)}$ в уравнение семейства кривых выносливости при программном нагружении, и при этом имея в виду обозначение (7), получим:

$$\lg \sigma_{rn}^{(n)} = \lg \sigma + \lg (Qq + 1) + \frac{\lg N^{(n)} - \lg N}{m^{(n)}}, \quad (10)$$

где $\lg N^{(n)} = \lg N + k_n S_{N_r}$; $m^{(n)} = m_{50} + k_n S_m$.

Уравнение (10) позволяет вычислить вторичный предел выносливости в зависимости от интегрального параметра Q и параметров уравнения семейств исходной кривой выносливости с учетом вероятности разрушения. Точность расчета при использовании уравнений (5) и (10) определяется соответствием фактическому принятому условию о разности показателей наклона программной и исходной кривых выносливости ($m_n = m$) и достоверности величин коэффициента наклона кривых $q = f(Q)$. Достоверные значения величины коэффициента наклона q для группы материалов, близких по своим механическим характеристикам, можно получить путем статистической обработки экспериментальных данных, накопленных к настоящему времени.

В табл. 1 приведены значения вторичных пределов выносливости σ_{-1} по данным испытаний [2, 4, 5, 7] при режимах нагружений, показанных на рис. 1. Здесь n — число испытаний, n_0 — число циклов изменения напряжения от $\sigma_{\min}$ до $\sigma_{\max}$ в блоке режима нагружения (объем блока).

Статистическая обработка данных табл. 1 позволила представить семейство уравнений (1), (2) при разной вероятности неразрушения в виде:

$$\sigma_{rn}^{(n)} = \sigma_{-1} (Qq_n + 1), \quad (11)$$

Таблица 1

Режим нагружения по рис. 1. Материал	Q	σ_{-1n} кг/мм ²	Режим нагружения по рис. 1. Материал	Q	σ_{-1n} кг/мм ²
Рис. 1, а [4] Сталь 45 $\sigma_B = 70,7$ $\sigma_T = 37,4$	0 0,176 0,400 0,480 0,600 0,776	33,0 36,0 38,0 39,0 39,6 43,0	Рис. 1, в [7] Сталь 45 $\sigma_B = 64,5$ $\sigma_T = 39,0$	0 0,020 0,083 0,152 0,165	28,5 28,5 29,5 30,5 31,5
Рис. 1, а [4] Сталь 40 $\sigma_B = 64,5$ $\sigma_T = 37,9$	0 0,194 0,440 0,528 0,661	30,0 33,9 34,2 34,4 37,5		0 0,001 0,167 0,304 0,330	28,5 29,0 30,0 31,0 32,0
Рис. 1, а [4] Сталь 40X $\sigma_B = 82,0$ $\sigma_T = 54,0$	0 0,102 0,280 0,454 0,632 0,824	57,0 61,0 60,0 62,0 66,0 70,0	Рис. 1, в [7] Сталь 45X $\sigma_B = 81,0$ $\sigma_T = 54,6$	0 0,017 0,083 0,152 0,165	35,5 36,5 37,0 37,5 38,5
Рис. 1, а [4] Сталь 40XH $\sigma_B = 107,6$ $\sigma_T = 98,7$	0 0,104 0,236 0,283 0,456 0,640 0,840	56,0 58,0 59,9 61,0 60,5 63,0 72,5	Рис. 1, з [2] Сталь 45 $\sigma_B = 69,5$ $\sigma_T = 49,6$	0 0,083 0,126	27,5 30,0 30,5
Рис. 1, б [5] Сталь 40X $\sigma_B = 95,0$ $\sigma_T = 55,0$	0 0,250 0,500 0,500 0,670	44,0 49,6 52,5 53,6 57,3	Рис. 1, з [2] Сталь 45X $\sigma_B = 84,5$ $\sigma_T = 55,0$	0 0,083 0,126	33,2 35,0 35,8

где

$$q_n = q_{50} + k_n S_q; S_q = \frac{S_0}{S_K} \sqrt{\frac{1 - r_{n1}}{n}}; K = \frac{\sigma_{-1n}}{\sigma_{-1}};$$

$q_{50} = 0,3041 - 50^n$ — вероятное значение коэффициента наклона;

$r_{n1} = 0,9256$ — коэффициент корреляции.

На рис. 2 приведено семейство кривых зависимости (11) с 90% доверительными границами при 90% нижней и 10% верхней вероят-

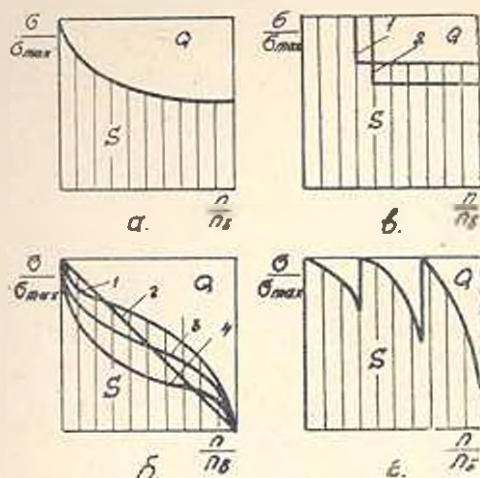


Рис. 1. Графики режимов нагружения: а) непрерывный [4]; б) интегральных функций бета (кривая 1), равновероятного (кривая 2), нормального (кривая 3) и гамма (кривая 4) распределений нагрузок [5]; в) двухступенчатый [7]; г) непрерывно-ступенчатый [2].

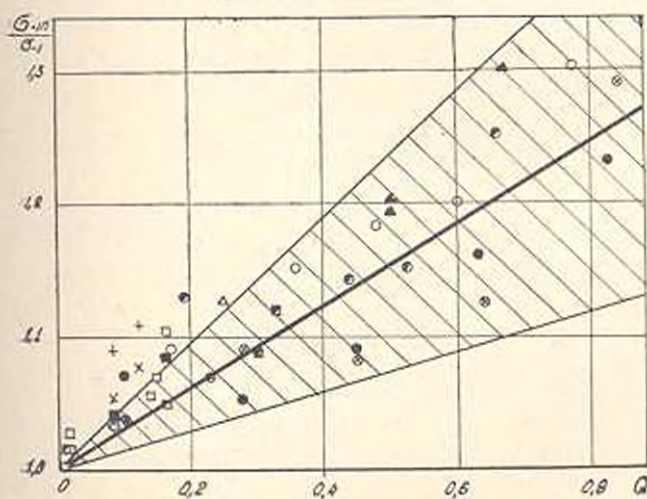


Рис. 2. Семейство кривых $\sigma_{\lg N} = f(Q)$ при 90, 50 и 10% вероятности переломов для данных испытаний образцов из стали:

- | | |
|----------------|--------------------|
| ○ — сталь 45 | ▲ — сталь 40X [5]; |
| ● — сталь 40 | □ — сталь 45 [7]; |
| ● — сталь 40X | ■ — сталь 40X [7]; |
| ○ — сталь 40XH | + — сталь 45 [2]; |
| | × — сталь 40X [2]; |

ностей неразрушения. Там же точками нанесены экспериментальные данные по табл. 1. Высокий коэффициент корреляции r_{11} подтверждает справедливость стохастически линейной связи между вторичным пределом выносливости σ_{-1n} и параметром Q .

С целью оценки расчетной зависимости (10) по данным параметров корреляционных уравнений исходной и вторичных кривых выносливости при режиме нагружения по рис. 1, 2, приведенных в табл. 2,

рассчитаны вторичные пределы выносливости на базе нагружений $N = 10^3$ циклов при 90, 50 и 10% вероятностях неразрушения. Расчетные и экспериментальные значения σ_r приведены в табл. 3.

Таблица 2

Материал	Q	$\lg N$	$\lg \sigma$	m	S_m	$S_{N\sigma}$
Сталь 45	0	5,10639	1,50744	10,44	1,8667	0,24612
	0,126	5,41365	1,52608	13,75	1,5895	0,19112
	0,083	5,12020	1,52741	14,52	2,2406	0,37283
Сталь 40X	0	5,09144	1,57226	11,75	1,3257	0,15238
	0,126	5,11567	1,62684	12,95	1,3376	0,20536
	0,083	5,24580	1,59493	12,84	0,8419	1,12664

Таблица 3

Материал	$P_{0,0}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,5$					$\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,66$				
		$Qq_0 + 1$	σ_r	σ_r (зкл)	σ_r (расч)	σ_r/σ_d	$Qq_0 + 1$	σ_r	σ_r (зкл)	σ_r (расч)	σ_r/σ_d
Сталь 45	90	1,019	30,5	34,8	31,0	10,5	1,012	30,5	31,5	30,8	2,2
	50	1,039	33,0	36,0	34,3	4,7	1,025	33,0	34,3	33,8	1,5
	10	1,059	34,6	36,9	36,7	0,5	1,039	34,6	36,4	36,0	1,1
Сталь 40X	90	1,019	36,5	41,2	37,2	10,0	1,012	36,5	40,0	37,0	7,5
	50	1,039	38,1	43,2	39,6	8,5	1,025	38,1	41,1	39,1	5,0
	10	1,059	39,2	45,2	41,5	8,0	1,039	39,2	41,2	40,5	1,7

Анализ показывает, что отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет в среднем 3—5% и идет в запас прочности. По сравнению с ранее предложенными методами, например, [4, 5], настоящий метод обеспечивает сопоставимую точность и позволяет статистически обосновать назначение расчетной величины напряжения при заданном сроке работы с учетом определенной вероятности неразрушения. Приведенные данные указывают на возможность использования предлагаемой методики для практических расчетов вторичных пределов выносливости.

Ս. Ա. ԳՅՍՊԱՐՅԱՆ, Ս. Հ. ՄԱԿ

ԲԵՌՆԱՎՈՐՈՒՄՈՒՆ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԿԵՊԸՐՈՒՄ
ԿԻՄԱՑԿՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. ի. մ.

Հոդվածում քննարկվում է չբարձրացած հալանակառնության հաշվառումը պիմացկունության երկրորդային առճամունների հաշվարկման հնարավորությունը՝ կախված դիմացկունության սկզբնական կորի պարամետրներից ու բնականորեն ռեժիմի դնահատման (Չ ինտեգրալ պարամետրից: Տրված է $\sigma_r = f(L)$ կախման քանակական գնահատումը միջին-ածխածնային կոնստրուկցիոն պողպատների համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Серенсен С. В., Колево В. П. Долговечность деталей машин с учетом вероятности разрушения при нестационарном переменном нагружении. „Вестник машиностроения“, № 1, 1966.
2. Гаспарян С. А., Мак С. А., Олейник Н. В. Об оценке режима нагружения при усталостных испытаниях. Сб. „Детали машин и ПТМ“, вып. 8, Киев, 1968.
3. Гарф М. Э., Бузлов Е. Г., Павловский В. Е. Об особенностях накопления усталостного повреждения при спектрах нестационарной напряженности, распределяющихся ниже исходного предела усталости. „Вестник машиностроения“, № 6 1964.
4. Коновалов А. В. Рациональное нагружение металлов при обеспечении длительной долговечности. „Вестник машиностроения“, № 1, 1967.
5. Решетов Д. Н., Чатынян Р. М. Исследование изгибной прочности зубьев зубчатых колес при переменных режимах нагружения. „Вестник машиностроения“, № 1, 1964.
6. Шашин М. Я. Методика статистической обработки экспериментальных данных с учетом вероятности разрушения и различия дисперсий по напряжениям. Труды АМИ, вып. 23, 1962.
7. Олейник Н. В., Нисен Чоні Гисп. Предел усталости при нестационарном нагружении. Сб. „Детали машин и ПТМ“, вып. 6, Киев, 1967.