

М.Г. СТАКЯН, Ш.ДЖ. СИСТАНИ, М.С. ТОРОСЯН

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

На основе комплексного учета проектно-технологических мероприятий дана количественная оценка надежности конструкции машины выводом математических моделей процессов усталостных повреждений и поверхностного упрочнения для ответственных деталей конструкции.

Ключевые слова: вал, параметры кривой усталости, поверхностное пластическое деформирование, надежность, математическая модель.

Проблема создания современной конструкции конкурентоспособной машины, отличающейся высокой производительностью, безотказностью работы за весь срок службы, выпускаемой в крупносерийном или массовом производстве, обладающей минимальной материалоемкостью и затратами на изготовление и эксплуатацию в условиях подорожания конструкционных и горюче-смазочных материалов, выдвигает требования по использованию всего резерва несущей способности ответственных деталей и сборочных единиц конструкции. Этого можно достичь за счет регулирования напряженно-деформированного состояния опасных сечений деталей, выбора доступных и недорогих марок конструкционных сталей и применения упрочняющих технологий для повышения сопротивления усталости и износостойкости их рабочих поверхностей [1-3].

Однако прогнозирование надлежащего уровня безотказности работы элементов конструкции, различных по размерам и формам, технологии изготовления, режимам нагружения и эксплуатационным условиям, является сложной задачей. Это обусловлено тем, что на выносливость деталей влияет большое число факторов, разнообразное сочетание действия которых затрудняет надежную оценку их работоспособности с вероятностных позиций [4].

Для достоверного определения характеристик сопротивления усталости необходимо воспользоваться уравнениями семейств квантильных линий усталости, параметром которых является уровень вероятности неразрушения $P(N)$, представленный квантилем z_p нормированной функции нормального распределения $P(z)$, и которые имеют следующий вид:

- для зоны $N \leq 5 \cdot 10^6$ (левая ветвь) –

$$N \leq N_{G(v)}, \lg N = (\lg \overline{N_{(v)}} + z_p s_{Nr(v)}) - (\overline{m_{(v)}} + z_p s_{m(v)})(\lg \sigma - \lg \overline{\sigma_{(v)}}) = C_{(v)} - m_{(v)} \lg \sigma; \quad (1)$$

- для зоны $N > 5 \cdot 10^6$ (правая ветвь) -

$$N > N_{G(v)}, \lg N_{G(v)}, \lg \sigma_{R(v)} = (C_{(v)} - \lg N_{G(v)})/m_{(v)}. \quad (2)$$

В (1)-(2) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} m_{(v)} &= \overline{m_{(v)}} + z_p s_{m_{(v)}}, \quad C_{(v)} = \overline{C_{(v)}} + z_p s_{C_{(v)}}, \quad \overline{m_{(v)}} = \overline{r_{(v)}}/s_{N(v)}^2, \\ \overline{C_{(v)}} &= \overline{m_{(v)}} \overline{\lg \sigma_{(v)}} + \overline{\lg N_{(v)}}, \quad s_{Nr(v)} = s_{N(v)} \sqrt{(1-r_{(v)}^2)(n-1)/(n-2)}, \\ s_{m(v)} &= (s_{N(v)}/s_{\sigma(v)}) \sqrt{(1-r_{(v)}^2)(n-1)/(n-2)}, \quad s_{C(v)} = s_{Nr(v)} + s_{m(v)} \overline{\lg \sigma_{(v)}}, \\ r_{(v)} &= \mu_{(v)}/s_{N(v)} s_{\sigma(v)}, \quad \overline{\lg N_{(v)}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \lg N_{i(v)}, \quad \overline{\lg \sigma_{(v)}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \lg \sigma_{i(v)}, \quad (3) \\ s_{N(v)} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{i(v)} - \overline{\lg N_{(v)}})^2}, \quad s_{\sigma(v)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg \sigma_{i(v)} - \overline{\lg \sigma_{(v)}})^2}, \\ \mu_{(v)} &= \frac{1}{n-1} \sum_1^n (\lg N_{i(v)} - \overline{\lg N_{(v)}})(\lg \sigma_{i(v)} - \overline{\lg \sigma_{(v)}}), \end{aligned}$$

где $m_{(v)}, C_{(v)}$ - показатели наклона и параметры квантильных линий усталости; $\overline{\lg \sigma_{(v)}}, \overline{\lg N_{(v)}}$ - координаты центров распределения циклических долговечностей; $s_{Nr(v)}$ - меры индивидуального рассеяния данных на уровнях центров распределения; $s_{m(v)}$ - с.к.о. показателей наклона; $\mu_{(v)}$ - корреляционные моменты; $r_{(v)}$ - коэффициенты линейной корреляции; $\overline{\lg \sigma_{(v)}}, \overline{\lg N_{(v)}}$ - координаты экспериментальных точек; n - объем испытаний (в (1)-(3) принята краткая форма представления параметров, например, $\overline{m_{(v)}}$ означает \overline{m} или \overline{m}_v для левой ветви квантильных линий).

В уравнениях (1)-(3) величины m, C, N_G, σ_R являются интегральными характеристиками прочности и долговечности деталей в широком интервале многоциклового усталости ($10^5 \leq N \leq 10^7$), практически охватывающем весь срок службы современных машин и технологического оборудования и представляющем значительный интерес. Указанные величины взаимосвязаны. На основании теоретико-экспериментальных разработок, базирующихся на анализе значительного объема вычислений, выведены эмпирические функции [3]

$$m = f_1(\sigma_R), C = f_2(\sigma_R), C = f_3(m), N_G = f_4(\sigma_R), \quad (4)$$

которые являются уравнениями регрессии первой степени ($|r| = 0,85 \dots 0,95$) и позволяют с достаточной точностью расчетным путем определить основные параметры (1)-(3), минуя длительные и дорогостоящие испытания на усталость (особенно натурные).

Эксплуатационные свойства и несущая способность деталей машин в значительной степени определяются физико-механическим состоянием их рабочих поверхностей. Эффективным и доступным методом формирования поверхностного слоя является поверхностное пластическое деформирование (ППД), которое изменяет микроструктуру и свойства материала, повышает его твердость и прочность за счет остаточных сжимающих напряжений, снижает шероховатость поверхности и создает регулярный микрорельеф. Форма микронеровностей этого микрорельефа благоприятна практически для всех случаев эксплуатационных режимов, т.к. пологая форма выступов и впадин на 1...2 порядка ниже, чем при обработке резанием, и характеризуется большей опорной поверхностью [4].

В [5,6] рассмотрено изменение характеристик физико-механического состояния поверхностных слоев валов, изготовленных из среднеуглеродистой и низколегированной стали 40X в состоянии поставки ($\sigma_B = 870 \text{ МПа}$, $HV = 215 \dots 250$), широко применяемой в передаточных механизмах машин различного назначения, в зависимости от режимных параметров упрочняющей технологии (обкатка роликом). Изменение этих величин представлено в виде многопараметрической зависимости

$$\Psi(HV, \Delta h, R_a, R_z, R_{max}, v, s, t, F) = 0, \quad (5)$$

которая для практического применения, аналогично (4), заменена системой параметрических функций:

$$HV = f_1(\Delta h, F, s), HV_{max} = f_2(F, s), \Delta h = f_3(F, s), R_a, R_z, R_{max} = f_{4,5,6}(F, s), \quad (6)$$

где HV – микротвердость; F и s - нормальная сила (H) и продольная подача обкатываемого элемента, мм/об ; R_a, R_z, R_{max} - параметры шероховатости обработанной поверхности, мкм ; Δh - глубина наклепанного слоя, мм .

Полученный экспериментальный материал обработан по вычислительной программе [5]. Выведены математические модели процесса упрочнения, позволяющие выбрать оптимальные параметры упрочняющей технологии [6].

Логическим завершением вычислений, которые до настоящего времени раздельно относятся к математическому моделированию процессов накопления усталостных повреждений с одной стороны и выполнению упрочняющих технологий - с другой, является третий этап расчетных процедур: установление функциональных связей между двумя группами параметров указанных процессов, позволяющее дать оценку надежности конструкции машины на основе комплексного учета расчетно-проектных и технологических мероприятий.

Для точного воспроизводства регрессионных связей между параметрами (1)-(3) в данной работе рассматривается вариант получения указанных связей только при учете упрочняющих технологий, т.к. взаимное расположение сравниваемых семейств квантильных линий усталости имеет свои отличительные особенности - точка перегиба линий усталости $G(\sigma_R, N_G)$ с увеличением степени наклепа поверхностных слоев деталей до определенной величины перемещается в зону больших циклических перенапряжений и долговечностей, а показатели рассеяния циклических долговечностей несколько снижаются [3]. На градиент параметров (1)-(3) влияют также вид упрочняющей технологии и ее совместное применение с термообработкой или нанесением защитных покрытий. Учитывая весь спектр действия различных факторов, из всего объема ранее выполненных исследований выбраны и классифицированы варианты испытаний, относящиеся к валам, изготовленным из конструкционных сталей 45 и 40X, подвергнутых пластическому обкатыванию поверхностей упрочняющим инструментом и испытанных при циклическом изгибе или изгибе с кручением. Рассмотренные испытания классифицированы по диаметру d , коэффициенту концентрации напряжений α_σ , глубине наклепанного слоя Δh и режимным параметрам обкатывания V, s, t .

Аналогично (5), для новой группы параметров, характеризующих материало-ведческие, прочностные и технологические аспекты проектирования, предложена новая многопараметрическая связь:

$$\Phi[(\sigma_B, \sigma_R, HB, M), (C, m, N_G, d, \alpha_\sigma), (V, S, t, \Delta h, HV)] = 0, \quad (7)$$

которая также заменена новой системой уравнений

$$\begin{cases} \Delta h = \varphi_1(F, S), \bar{\sigma}_R = \varphi_2(\Delta h, \alpha_\sigma, d), d = \varphi_3(\bar{\sigma}_R, \alpha_\sigma, \Delta h), \delta M = \varphi_4(d, \alpha_\sigma, \Delta h), \\ \bar{m} = \varphi_5(\bar{\sigma}_R), \bar{C} = \varphi_6(\bar{m}), \bar{m} = \varphi_7(HV_{max}), \bar{m} = \varphi_8(\Delta h), \end{cases} \quad (8)$$

где δM – относительное снижение массы детали при уточнении прочностных расчетов.

Классифицируя и используя ранее выполненный значительный объем экспериментальных исследований по ППД ответственных деталей и узлов машин, составлены базы данных параметров (7) для наиболее распространенного конструкционного материала – стали 40X. Для выбора вида математической модели из уравнений

$$y_x = a_0 + a_1x, \quad (9)$$

$$y_x = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (10)$$

$$y_x = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (11)$$

$$y_x = a_0 + a_2x^{-(m+\Delta m)} \quad (12)$$

применен пакет прикладных программ (ППП) [5], позволяющий выполнить трехуровневую оптимизационную процедуру по методу наименьших квадратов (МНК) – графический выбор функций из (9)-(12); расчеты минимальных сумм квадратов разностей $E_i = \sum (y_i - y_{xi})^2 \Rightarrow \min$; выбор оптимальной функции из (9)-(12), обеспечивающей условие

$$\min(E_i \Rightarrow \min). \quad (13)$$

Результаты статистических вычислений представлены в табл. 1 – 3.

Таблица 1

Выбор оптимальной функции для $\overline{\sigma}_R = \varphi_2(\Delta h, \alpha_\sigma, d)$

№	Образцы, $d=7,5 \dots 20 \text{ мм}$	d , мм	Значения E для (9) - (12)				Параметры оптимальной функции				
			(9)	(10)	(11)	(12)	a_0	a_1	$a_2 \cdot 10^6$	$a_3 \cdot 10^9$	
1	Гладкие	7,5	45,030	45,029	45,027	45,033	485334	-6,676	21	1,5	
2		10,0	9,875	9,873	9,872	9,878	485870	-4,194	7,2	2,3	
3		15,0	15,488	15,484	15,465	15,491	517427	-4,926	16	0,95	
4		20,0	25,842	25,839	25,836	25,845	550714	-4,928	4,1	1,4	
5	С концентраторами напряжений $\alpha_\sigma = 1,01 \dots 1,69$	7,5	144,487	144,482	144,480	144,490	310833	-1,837	3,2	1,5	
6		10,0	1,479	1,473	1,471	1,482	372119	-1,414	11	1,6	
7		15,0	14,642	14,593	14,541	14,645	396861	-1,824	1,8	1,4	
8		20,0	39,719	39,712	39,710	39,722	432923	-2,291	0,81	0,62	
9		$\alpha_\sigma = 1,70 \dots 3,12$	7,5	2,146	2,139	2,136	2,149	188627	-1,305	2,4	1,4
10			10,0	12,432	12,398	12,379	12,435	244478	-2,063	2,1	1,9
11			15,0	4,397	4,389	4,386	4,413	265133	-1,697	0,63	0,58
12			20,0	2,508	2,505	2,504	2,512	294365	-2,313	2,5	1,8

Таблица 2

Выбор оптимальных функций для $d = \varphi_3(\bar{\sigma}_R, \alpha_\sigma, \Delta h)$ и $\delta M = \varphi_4(d, \alpha_\sigma, \Delta h)$

№	Образцы, $d=7,5 \dots 20$ мм	Δ , мм	Значения $E \cdot 10^5$ для (9) - (12)				Параметры оптимальной функции				
			(9)	(10)	(11)	(12)	a_0	a_1	$\frac{a_2 \cdot 10^4}{a_2 \cdot 10^6}$	$\frac{a_3 \cdot 10^5}{a_3 \cdot 10^8}$	
1	Гладкие	0	$\frac{0,0022}{-}$	$\frac{0,0021}{-}$	$\frac{0,0023}{-}$	$\frac{0,0024}{-}$	$\frac{0,0025}{-}$	$\frac{1,000}{-}$	$\frac{2,000}{-}$	$\frac{-1}{-}$	
2		0,05	$\frac{0,0011}{40}$	$\frac{0,0011}{30}$	$\frac{0,0011}{30}$	$\frac{0,0012}{170}$	$\frac{0,0026}{1,0220}$	$\frac{0,999}{-0,0153}$	$\frac{-1}{7,2}$	$\frac{5}{2,3}$	
3		0,10	$\frac{0,0012}{6}$	$\frac{0,0012}{4}$	$\frac{0,0012}{2}$	$\frac{0,0013}{8}$	$\frac{0,0028}{0,9641}$	$\frac{0,999}{0}$	$\frac{2}{1,6}$	$\frac{-5}{0,95}$	
4		0,15	$\frac{0,0030}{1}$	$\frac{0,0028}{0,8}$	$\frac{0,0026}{0,8}$	$\frac{0,0039}{4}$	$\frac{0,0034}{0,9264}$	$\frac{0,999}{0}$	$\frac{-6}{4,1}$	$\frac{7}{1,4}$	
5	С концентраторами напряжений	$\alpha_\sigma = 1,01 \dots 1,69$	0	$\frac{1,875^*}{-}$	$\frac{1,863^*}{-}$	$\frac{1,861^*}{-}$	$\frac{1,986^*}{-}$	$\frac{0,0025}{-}$	$\frac{1,000}{-}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{-5}{-}$
6			0,05	$\frac{1,875^*}{2}$	$\frac{1,873^*}{1}$	$\frac{1,872^*}{1}$	$\frac{2,075^*}{6}$	$\frac{0,0026}{0,8886}$	$\frac{0,999}{0}$	$\frac{0}{3,2}$	$\frac{-3}{1,5}$
7			0,10	$\frac{1,875^*}{0,02}$	$\frac{1,873^*}{0,007}$	$\frac{1,871^*}{0,02}$	$\frac{1,995^*}{0,06}$	$\frac{0,0028}{0,8500}$	$\frac{0,999}{0}$	$\frac{-4}{11}$	$\frac{2}{1,6}$
8			0,15	$\frac{1,875^*}{0,5}$	$\frac{1,872^*}{0,4}$	$\frac{1,870^*}{0,4}$	$\frac{2,071^*}{1}$	$\frac{0,0034}{0,8020}$	$\frac{0,999}{0}$	$\frac{2}{1,8}$	$\frac{-3}{1,4}$
9	С концентраторами напряжений	$\alpha_\sigma = 1,70 \dots 3,12$	0	$\frac{1,875^*}{-}$	$\frac{1,874^*}{-}$	$\frac{1,873^*}{-}$	$\frac{1,922^*}{-}$	$\frac{0,0025}{-}$	$\frac{1,000}{-}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{1}{-}$
10			0,05	$\frac{1,875^*}{9}$	$\frac{1,876^*}{7}$	$\frac{1,872^*}{6}$	$\frac{2,075^*}{20}$	$\frac{0,0026}{0,8385}$	$\frac{0,999}{0,0010}$	$\frac{-5}{0,81}$	$\frac{8}{0,62}$
11			0,10	$\frac{1,875^*}{3}$	$\frac{1,873^*}{2}$	$\frac{1,871^*}{2}$	$\frac{2,003^*}{10}$	$\frac{0,0028}{0,7975}$	$\frac{0,999}{-0,0001}$	$\frac{0}{2,4}$	$\frac{-4}{1,4}$
12			0,15	$\frac{1,875^*}{0,8}$	$\frac{1,874^*}{0,6}$	$\frac{1,872^*}{0,6}$	$\frac{1,986^*}{3}$	$\frac{0,0034}{0,7423}$	$\frac{0,999}{-0,0001}$	$\frac{-6}{2,1}$	$\frac{7}{1,9}$

Примечания: 1. В числителе даны расчетные данные для $d = \varphi_3(\bar{\sigma}_R, \alpha_\sigma, \Delta h)$, а в знаменателе - $\delta M = \varphi_4(d, \alpha_\sigma, \Delta h)$.

2. Значения E , обозначенные *, представлены без множителя $\cdot 10^5$.

Таблица 3

Выбор оптимальных функций для $\bar{m} = \varphi_5(\bar{\sigma}_R)$, $\bar{C} = \varphi_6(\bar{m})$

№	Функции параметров кривой усталости	Значения E для (9) - (12)				Параметры оптимальной функции			
		(9)	(10)	(11)	(12)	a_0	a_1	a_2	a_3
1	$m = \varphi_1(\bar{\sigma}_R)$	98,905	98,864	98,861	106,012	-0,665	0,034	$5,7 \cdot 10^6$	$-9,4 \cdot 10^9$
2	$\bar{C} = \varphi_2(\bar{m})$	21,753	21,132	20,657	699,184	4,470	2388	0,051	-0,002

Предварительный анализ данных табл. 1 – 3 свидетельствует о преобладающей значимости кубической параболической связи (11), для которой и представлены коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 . Однако значения a_2, a_3 в большинстве случаев указывают на незначительное влияние на конечный результат 2-го и 3-го членов уравнения (11), который меняется в пределах допустимых расчетных погрешностей ($\sim 5 \dots 8\%$). Поэтому в практических расчетах можно дать предпочтение прямолинейной связи (9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несущая способность упрочненных деталей машин / **А.Ф. Дашенко, В.С. Кравчук, В.Д. Иоргачев**. - Одесса: Астропринт, 2004. - 160 с.
2. **Курочкин Л.Я.** Статистический подход к выбору технологии и упрочнения деталей машин // Респ. межвед. н.-т. сб. "Детали машин". - Киев: Техника, 1990. - Вып. 51. – С. 90 - 94.
3. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин / **Н.В. Олейник, В.П. Кычин, А.Л. Луговской**. - Киев: Техника, 1984. – 151 с.
4. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / **И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидуневич** и др. - Минск: Выш. шк., 2010. – 336 с.
5. **Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э.** Математическое моделирование процесса упрочнения рабочих поверхностей // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2013. - Т. 66, N 1. - С. 20 - 27.
6. **Стакян М.Г., Систани Ш.Дж., Айказян М.Э.** Моделирование физико-механического состояния поверхностных слоев с применением упрочняющих технологий // Вестн. ГИУА (П). Сер. "Механика, машиновед., машиностр". - 2013. - Вып. 16, N 3. - С. 52 – 58.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 08.01.2013.

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Շ.Ջ. ՄԻՍԹԱՆԻ, Մ.Ս. ԹՈՐՈՍՅԱՆ

**ՄԵՔԵՆԱՄԱՍԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ
ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆ ԴԵՊԼՈՒՄ**

Նախագծատեխնոլոգիական միջոցառումների համալիր հաշվառման հիման վրա տրվել է մեքենայի կառուցվածքի հուսալիության քանակական գնահատումը՝ դուրս բերելով կառուցվածքի պատասխանատու մեքենամասերի հոգնածային վնասվածքների և մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացման գործընթացների մաթեմատիկական մոդելները:

Առանցքային բառեր. լիսեռ, հոգնածային կորի պարամետրեր, մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացում, հուսալիություն, մաթեմատիկական մոդել:

M.G. STAKYAN, SH.J. SISTANI, M.S. TOROSYAN

**MACHINE ELEMENTS STRENGTH AND LONGEVITY ASSESSMENT IN CASE OF
SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

On the basis of a complex consideration of design-and-technological measures, a quantitative evaluation of the structure reliability has been given by deriving mathematical models of fatigue damages and surface strengthening of responsible elements of the structure.

Keywords: shaft, parameters of fatigue curve, surface plastic deformation, reliability, mathematical model.