

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ю. П. ШАГАЕВ, В. А. ЗИМБИНКИ, М. Г. СТАКЯН, Г. Д. ПЕТРОСЯН,
Н. С. ИСАХАНИЯСОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Повышение рабочих скоростей и производительности сельскохозяйственных машин и транспортных средств различного назначения при сохранении основных весовых и конструктивных параметров их энергоисточника (ДВС) приводит к усилению напряженности ответственных и дорогостоящих деталей, в частности, коленчатого вала. Согласно последним статистическим данным, примерно 80% отказов коленчатых валов происходит от знакопеременных изгибающих напряжений, под действием которых в галтельных переходах коренных и шатунных шеек происходит зарождение и развитие усталостных трещин. Изучение напряженного состояния в вершине трещины с учетом энергетических представлений ее развития и анализ энергетического баланса позволил разработать технологические мероприятия по повышению усталостной прочности и трещиностойкости коленчатых валов [1]. Полное использование сопротивления усталости коленчатых валов диктует необходимость подробного изучения процесса усталостного разрушения в условиях эксплуатации или стендовых испытаний и прогнозирование на этой основе их остаточного ресурса [2].

Для оценки и анализа усталостных повреждений тяжело нагруженных деталей машин наряду с традиционными все чаще применяют физические методы неразрушающего контроля, позволяющие вести дискретные или непрерывные наблюдения за процессом усталости. В основу этих методов лежит установление характера изменения физических свойств материала (магнитной проницаемости, удельной электропроводности, магнитной вязкости и др.), являющихся интегральными характеристиками структурных изменений при нарушении сплошности материала в процессе усталости. По характеру изменения этих свойств можно производить оценку характеристик сопротивления усталости, проследить за кинетикой развития микротрещины и установить их предельно допустимую длину, необходимую для определения циклической вязкости разрушения K_{1c} . Выбор метода неразрушающего контроля и контролируемых характеристик производится в зависимости от параболки

исследуемой детали, чувствительности метода и требований к точности оценки степени повреждений, способности обнаружить структурные изменения и микротрещины на ранних стадиях их возникновения и роста, а также доступности детали при измерениях и возможности производства измерений без разборки исследуемой сборочной единицы. На ранних стадиях периодического нагружения при наличии только структурных изменений в металле предпочтительными являются измерения структурно-чувствительных магнитных характеристик. При нарушении сплошности материала и появлении первых микротрещин, кроме указанных можно использовать также параметры электропроводности.

Регистрацию изменения магнитных характеристик материала (проницаемости и индукции) при испытаниях на усталость целесообразно производить магнитоферрозондовым методом, который заключается в периодическом сканировании двумя феррозондовыми преобразователями контролируемой поверхности в приложенном постоянном магнитном поле и в сравнении полученных сигналов с помощью регистрирующих приборов [3]. При этом регистрируются зависимости амплитуды и фазы спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от физико-механических свойств и степени повреждения материала. Это позволяет выявить малораскрытые трещины и осуществлять бесконтактный контроль с высокой скоростью [2]. Для контроля и комплексного исследования напряженно-деформированного состояния непосредственно на деталях в ИПФ АН БССР разработан ряд приборов и установок, в которых применены высокочувствительные феррозондовые преобразователи. Связь амплитуды сигнала э.д.с. высших гармоник с феррозондового преобразователя при этом основана на предложении о линейной зависимости между площадью петли гистерезиса и размером усталостной трещины. На возможность работы этого преобразователя в сильном магнитном поле было указано в [4], где метод высших гармоник применен для бесконтактного измерения деформаций в области малоциклового усталости.

В настоящей работе эти методы неразрушающего контроля в комплексе с натурными испытаниями применены для изучения кинетики развития микротрещин в коленчатых валах двигателя А-41 Алтайского моторного завода, изготовленных из стали 45 «селект». Для этого проведены испытания на усталость коленчатых валов и образцов из идентичного материала при круговом и плоском изгибе.

Результаты натурных испытаний в координатах $\lg M_n - \lg N$ обработаны известными методами математической статистики и с учетом постоянства дисперсии $\lg N (s_{\lg N}^2 \approx \text{const})$ представлены уравнениями регрессии первого порядка:

$$\lg N = (\overline{\lg N} + u \cdot s_{\lg N}) - r \frac{s_{\lg N}}{s_{\lg M_n}} (\lg M_n - \overline{\lg M_n}) = a - b \cdot \lg M_n, \quad (1)$$

где $\overline{\lg N}$, $\overline{\lg M_n}$ — координаты центра распределения; $s_{\lg N}$, $s_{\lg M_n}$ — с. к. о. $\lg N$ и $\lg M_n$; r — коэффициент корреляции; $s_{\lg N} = s_{\lg N} \sqrt{1-r^2}$ —

мера индивидуального рассеяния; $b = r \frac{s_{\lg N}}{s_{\lg M_n}}$ — коэффициент регрессии; $a = (\lg \bar{N} + u \cdot s_{\lg N}) + b \lg \bar{M}_n$; u — квантиль нормального распределения.

Для нашего случая: $\lg \bar{N} = 6,6145$; $\lg \bar{M}_n = 3,4714$; $\bar{M}_n = 2712 \text{ Н.м}$ ($N_0 = 10^3$): $s_{\lg N} = 0,384$; $s_{\lg M_n} = 0,0313$; $s_{\lg N} = 0,2174$; $r = -0,8243$; $b = 10,1128$.

Параметры уравнения (1) являются выборочными характеристиками, полученными при малом объеме испытаний ($n=16$). Для выполнения уточненных расчетов и повышения степени их достоверности следует произвести проверку гипотезы о значимости выборочного коэффициента корреляции r , т. е. уточнить степень тесноты корреляционной связи между $\lg N$ и $\lg M_n$, а затем определить доверительные интервалы значений r и b . Проверка значимости r при малом объеме выборки ($n < 50$) производится согласно t -критерию Стьюдента

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} > t_{\alpha, k}, \quad (2)$$

где $t_{\alpha, k}$ — табличное значение критерия при уровне значимости α и числе степени свободы $k = n - 2$.

Доверительные интервалы коэффициента корреляции ρ для генеральной совокупности определяют, используя преобразование Фишера. Для этого вычисляют z — критерии Фишера

$$\bar{z} - t_{\alpha} \cdot s_z < Z < \bar{z} + t_{\alpha} \cdot s_z \quad \text{или} \quad z_1 < Z < z_2, \quad (3)$$

где $\bar{z} = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)}$; $s_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}$; t_{α} — доверительный коэффициент, соответствующий уровню значимости α , а затем, используя переходные статистические таблицы, определяют интервал

$$r_1 < r < r_2, \quad (4)$$

соответствующий условию (3).

Значимость коэффициента регрессии b адекватно выполняется при соблюдении условия (2), а доверительный интервал β для генеральной совокупности определяется аналогичным образом:

$$b - t_{\alpha, k} \frac{s_{\lg N}}{s_{\lg M_n}} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}} < \beta < b + t_{\alpha, k} \frac{s_{\lg N}}{s_{\lg M_n}} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}. \quad (5)$$

В нашем случае при $\alpha = 0,05$, $k = 14$, $t_{\alpha} = 1,96$, $t_{\alpha, k} = 2,145$ и согласно (2): $t = 5,449 > t_{\alpha, k}$, что подтверждает наличие линейной корреляционной связи между $\lg N$ и $\lg M_n$. Соответственно, доверительные интервалы равны: $0,6475 < z < 1,7333$; $0,57 < \rho < 0,9375$; $9,5398 < \beta < 10,6860$.

При всей корректности выполнения статистических исчислений по (2) — (5) для уточненной оценки параметров уравнения (1) и получения доверительной области рассеяния $\lg N$ (рис. 1), используемой в уточненных расчетах на прочность и долговечность, указанный метод расчета является математической моделью для описания лишь последнего периода усталости — окончательного разрушения и поэтому носит в себе ограниченную информацию о протекании процесса усталостного разрушения.

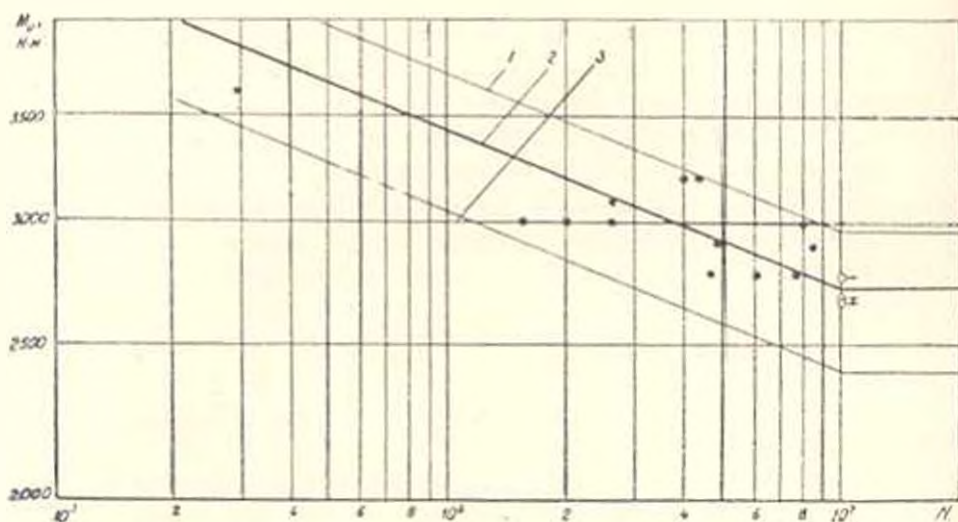


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний коленчатых валов. Линии 1, 2, 3 соответствуют 5, 50 и 99%-ной вероятности неразрушения.

Комплексным изучением физико-механических свойств сталей 45 и 40ХН [5, 6], а также другими многочисленными исследованиями показано, что процесс усталостного разрушения может быть разделен на отдельные периоды: а) инкубационный; б) нарушения сплошности материала и появления субмикротрещин; в) стабильного роста усталостных трещин; г) неустойчивого (критического) роста трещин.

В [7] предложен косвенный метод определения продолжительности действия указанных периодов. Измерениям микротвердости $H_{0.2}$ на поверхности образцов при периодическом нагружении выявлен типичный характер функции $H_{0.2} = f_1(N)$, экстремальные точки которой соответствуют границам периодов усталостного разрушения. Совмещая кривую усталости с семейством функции $H_{0.2} = f_1(N)$, полученной на разных уровнях перенапряжений, построили диаграмму усталости с линиями равной повреждаемости, соединяющими указанные экстремальные точки.

Для повышения точности и достоверности полученных результатов целесообразно при построении аналогичных диаграмм использовать прямые методы измерения магнитных характеристик, учитывающих интегральный эффект воздействия процесса усталости. К их числу от-

ваются магнитная вязкость и параметры магнитной индукции. Ранее проведенные опыты [5] показали возможность применения магнитной вязкости τ для описания этих процессов. При испытаниях образцов из стали 45 круговым изгибом при напряжениях, ниже предела выносливости значения τ остаются неизменными (рис. 2 — линии H и J). В области многоциклового усталости измерения τ хорошо фиксируют начало зарождения микротрещин в поверхностных слоях образца, а по мере их накопления значения τ монотонно растут. Градиент τ значительно увеличивается при высоких перенапряжениях, на стадии стабильного роста усталостных трещин.

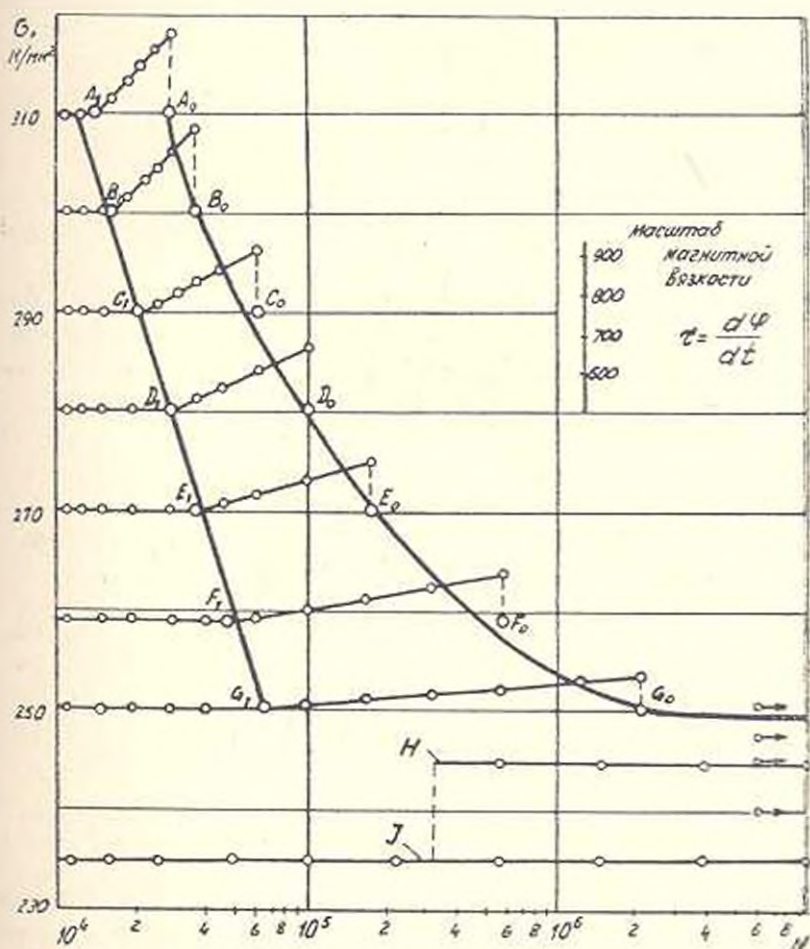


Рис. 2. Изменение магнитной вязкости τ от циклической долговечности (круговой изгиб образцов из стали 45).

Достоверность описания начального периода трещинообразования измерениями τ подтверждена также другими инструментальными методами исследования [5, 6], поэтому совмещение кривой усталости и функций $\tau = f_s(N)$ дает диаграмму усталости (рис. 2), которая наряду с оценкой сопротивления усталости деталей может быть использована

для получения информации о кинетике развития микротрещин. При этом линия равной повреждаемости A_0-G_0 соответствует началу зарождения трещин, а A_0-G_0 — окончательному разрушению. Учитывая инвариантность значения τ к циклической долговечности при напряжениях $\sigma_s \leq \sigma_R$, указанный метод может быть использован для ускоренного определения предела выносливости при испытании (1—2) образцов.

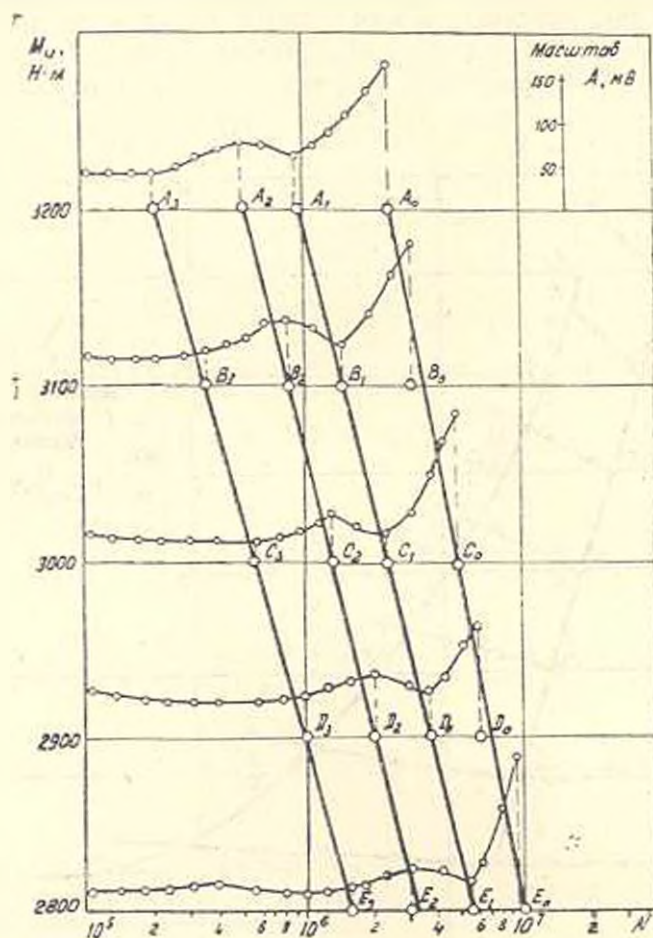


Рис. 3. Изменение приращения амплитуды э. д. с. A от циклической долговечности (плоский изгиб образцов из стали 40ХН).

При помощи микроферрозондового преобразователя исследовалось также влияние периодического нагружения на характер приращения амплитуды сигнала э.д.с. II гармоники A , пропорциональной нормальной составляющей магнитного потока рассеяния (испытания плоских образцов из стали 40ХН при циклическом изгибе). В отличие от τ , величина A до нарушения сплошности материала хотя практически остается постоянной, но ее значение зависит от уровня перегрузок. Графики функции $A = f_s(N)$ после появления кривых субмикротрещин приобретают немонотонный и волнообразный характер, а абсолютные значения A зависят от уровня M_0 . В целом, функция $A = f_s(N)$ по

сравнению с предыдущей обладает большей информативностью и может быть использована для дифференциальной оценки продолжительности действия периодов усталостного разрушения. Поступая аналогичным образом, получаем новую диаграмму усталости (рис. 3), в которой представлены линии равной повреждаемости, соответствующие началу развития: A_3-E_3 — субмикротрещин; A_2-E_2 — стабильных микротрещин; A_1-E_1 — нестабильных трещин, а линия A_0-E_0 — окончательному разрушению.

Графики функции $\tau = f_2(N)$ и $A = f_1(N)$ получены по результатам ограниченного объема испытаний и являются математическим описанием процесса трещинообразования, который в первом приближении можно считать случайным стационарным процессом. С учетом естественного рассеяния результатов испытаний на усталость зависимости $\tau = f_2(N)$ и $A = f_1(N)$ являются случайными функциями от циклической долговечности и поэтому для повышения точности и достоверности полученных диаграмм усталости и их использования в инженерных расчетах необходима оценка функций τ и A известными методами теории случайных процессов.

Рассмотренные методы исследования и контроля усталостных повреждений ответственных деталей и конструкций позволяют определить степень повреждаемости и производить диагностирование процесса усталости, а оценкой пороговых значений циклической вязкости разрушения K_{1c} выявлять техническое состояние деталей с трещинами с целью прогнозирования их остаточного ресурса. Они позволяют также установить предельные повреждения для своевременного производства планово-предупредительных работ и исключения вероятности простоев или аварий, вызванных внезапными усталостными разрушениями.

ИПФ АН БССР,
ЕрПИ им. К. Маркса

26 VI 1985

ՅՈՒ. Պ. ԵԱԿԻՆՈՎ, Վ. Ա. ԶԻՐԻՆԵԿԻ, Մ. Դ. ՍՏԱԿՅԱՆ,
Գ. Դ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ն. Ս. ԻՍԱԿԱՆՅԱՆ

ՄԵԿԱՉԵՎ ԻՐԱՅԻՆՆԵՐԻ ՀՈՐԴԱՆՈՒՅԻՆ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԳՐԱՅԵՄԻ
ՎԵՐԱՀՈՎՄԱՆ ԻՎ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ
ՏՐԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո ռ մ

Եարադրված են Ա-41 տրակտորային շարժիչի ծեկածն լիսեռի և նույն նյութից պատրաստված փորձանմուշների հոգնածային գիմադրության կոմպլեքսային հետադոտման արդյունքները: Առանց քայքայման վերահսկման ժամանակակից մեխոդներով (մագնիսաֆերոդոնդային, մրրկային հոսանքների) ծեկածն լիսեռներում և փորձանմուշներում հետադոտված է հոգնածային քայքայման պրոցեսը, որը թույլ է տվել կառուցել բողնածային գիտգրամներ՝ հաճախար վնասոթածրային դժերով, որոնք համապատասխանում են հոգնածային քայքայման հիմնական փուլերի սահմաններին:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кривчук С. П., Зиницкий В. А., Стахян М. Г., Петросян Г. Д. Кинетика развития усталостных трещин в швах коленчатых валов. — Изв. АН АрмССР (сер. ТН), 1981, т. XXXVII, № 6, с. 3—10.
2. Почтенный Е. К., Ракицкий А. А., Шагаев Ю. П. Оценка степени усталостного повреждения и прогнозирование остаточного ресурса деталей машин (методические указания. — Минск, 1981 — 32 с. (Пропринт/Печат. пробл. проч. и долг. маш. АН БССР: АТО9924).
3. А. с. 824019 (СССР) Способ контроля физико-механических параметров ферромагнитных материалов и преобразователь для его определения/Ю. П. Шагаев. — Опубл. в Б.И., 1981, № 15.
4. Зацепин Н. Н., Шапорюк Б. Д., Шагаев Ю. П. Контроль приложенных напряжений методами высших гармоник — В сб.: Авиационные материалы. Дефектоскопия материалов. ОНТИ, ВИАМ, 1979, вып. 6, с. 96—100.
5. Шагаев Ю. П. Исследование закономерностей усталостного разрушения стальных образцов электромагнитными методами контроля. — Дефектоскопия, 1970, № 5, с. 115—119.
6. Шагаев Ю. П. Выявление усталостной повреждаемости калиброванных пластин компрессоров. — Изв. АН БССР (сер. физ.-техн. наук), 1980, № 3, с. 105—109.
7. Олейник Н. В., Шагаев Ю. П., Стахян М. Г., Нейхання Н. С. Исследование распределения микротвердости усталостного пазла с целью диагностирования причин разрушения деталей. — В сб.: Тез. докл. II Республ. конф. по повыш. надеж. и долг. маш. и сооруж. Днепродзержинск, окт. 1985. — Киев: Наукова думка, 1985, с. 130—131.