

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетов Д. Н. Детали машин. — М.: Машиностроение, 1989. — 496 с.
2. Иосилевич Г. Б. Детали машин. — М.: «Машиностроение», 1988. — 376 с.
3. Пронин Б. А., Ревков Г. А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи. — М.: «Машиностроение», 1980. — 320 с.
4. Галаджев Р. С., Ровеньков Е. Д., Игнатенко Ю. А., Савенков М. В. Исследование деформаций и усилий в клиноременном контуре. — В сб. «Бесступенчато-регулируемые передачи», вып. 1, Ярославль, ЯПИ, 1976, с. 33-37.
5. Мартынов В. К. Прикладная теория передач трением гибкой связью. — «Проблемы машиностроения и автоматизации». 1993. — № 3—4. — С. 21—32.
6. Лукьянов А. С. Методы выбора и оценки характеристик вариатора транспортного средства. — Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2001.
7. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. — М.: «Наука», 1986. — 560 с.

621.785.

КРИТЕРИЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Д-р техн. наук, проф. И.Ф. ДЬЯКОВ, ст. препод. Р. М. САДРИЕВ

Предложен критерий долговечности деталей машин при совместном действии циклических нагрузок в зоне предела текучести материала, когда амплитудные значения циклических нагрузок составляет не более 65 % от предела текучести. Адекватность модели подтверждена сравнением данных расчета с экспериментальными данными для стали 45 и 40Х при нормальной температуре.

It is proposed to use a legerity criterion of machine parts under the joint influence of cyclic loads within the material fluidity limit zone when amplitude values of cyclic loads are not more than 65% material fluidity. The model adequacy is proved by comparing calculation data with experiment data for 40 and 45X steel at a normal temperature.

Одной из тенденций развития современного машиностроения является применение деталей, обеспечивающих прочность в условиях циклического нагружения при совместном действии внешних нагрузок. На современном этапе физические представления о механизме разрушения материалов базируются на кинетической концепции прочности, положения которой представлены в работах Г. Н. Бартенева, С. Н. Журкова и других исследователей [1]. В этой концепции долговечность детали под нагрузкой принимается в качестве основной величины, определяющей ее прочность. Целью настоящей работы было обобщение энергетической концепции на процессы, происходящие в материале при циклическом нагружении, не превышающем некоторой критической точки предела текучести.

Известно, что оценка долговечности деталей машин по времени работы (километры пробега, мото-часы, приведенное время), практикуемая в настоящее время, не учитывает многие факторы, существенно влияющие на их ресурс. К числу основных неучитываемых факторов относятся нагрузочные и скоростные режимы, влияющие на мощность двигателя. Для машин, работающих в широком диапазоне нагрузок и скоростей, существенна также работа на резонансных и длительных режимах.

Обобщая многие современные теоретические и экспериментальные данные, можно отметить, что процессы зарождения и развития усталостных повреждений обусловлены

явлениями генерирования, перемещения и накопления подвижных дефектов в теле при его циклическом деформировании.

Рекомендуемый нами подход к оценке долговечности деталей при эксплуатации машин основывается на использовании энергозатрат, так как коэффициент корреляции между энергозатратами и отказами деталей на 24% выше, чем между временем работы машины и отказами [2]. Энергия J (тепловая или механическая) является двигателем развития усталостных повреждений, структуру которых можно представить в виде схемы, рис. 1.

Каждый режим нагружения-разгружения характеризуется переменными процессами, которые описываются замкнутыми кривыми. Образующаяся при этом петля гистерезиса выражает накопление энергии в материале и, в зависимости от длительности действия t_i , изменяет свою площадь. Величина внешней работы, затраченной на деформацию материала и определяемой по площади петли гистерезиса, имеет вид

$$A_{\text{вн}} = A_r(N_{\text{ц}})\mu(\tau, \varphi)V_m K_{\text{ПР}} / 2\pi,$$

где A_r — площадь петли гистерезиса; $\mu(\tau, \varphi)$ — масштабный коэффициент; V_m — объем материала; $K_{\text{ПР}}$ — коэффициент пропорциональности.

По ее величине можно определить накопленную энергию в единице объема материала, которую можно выразить так: $J_{\text{ПФ}}(N_{\text{цикл}}) = A_r \mu_{\tau, \varphi} V_m$.

Площадь петли гистерезиса изменяется в зависимости от количества циклов нагружения, может быть $J_{\text{П}} < J_{\text{ПФ}}(N_{\text{ц}})_{\text{пр}}$; $J_{\text{П}} \geq J_{\text{ПФ}}(N_{\text{ц}})_{\text{пр}}$, причем $J_{\text{П}} \ll J_{\text{ПФ}}(N_{\text{цикл}})_{\text{пр}}$, где $J_{\text{ПФ}}(N_{\text{цикл}})_{\text{пр}}$ — предельное значение накопленной энергии от внутренних сил при нагружении. Если потенциальная энергия материала детали выше накопленных энергозатрат, то возникает разрушение материала. При совместном действии нескольких режимов нагружения коэффициенты запаса накопленной энергии представляются в виде

$$k_j = \frac{1}{\sqrt[m]{\sum \left(\frac{1}{k_i}\right)^m}}, \quad (1)$$

и по длительности действия,

$$k_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_i}\right)^m}, \quad (2)$$

где k_i — частный запас накопленной энергии при циклическом нагружении на i -ом режиме работы машины: $k_i = J(N_{\text{ц}})_i^{0*} / J(N_{\text{ц}})_i$; здесь $J(N_{\text{ц}})_i^{0*}$ — запас накопленной энергии в материале после появления микротрещин, соответствующий длительности t_i нагружения и разгрузки детали; m — показатель степени наклона ветви кривой $J_i = f(N_{\text{ц}})_i$ где $N_{\text{ц}}_i$ — число циклов после появления микротрещин [4]; n — число режимов нагружения машины.

Сравнительные данные по характеристикам циклической прочности образцов из сталей 45 и 40Х с различными вариантами термической обработки при постоянном режиме нагружения показали, что изменение площади петли гистерезиса до появления микротрещин относительно первоначального цикла составляет 8,3 единиц и после появления микротрещин — 11,1 единиц.

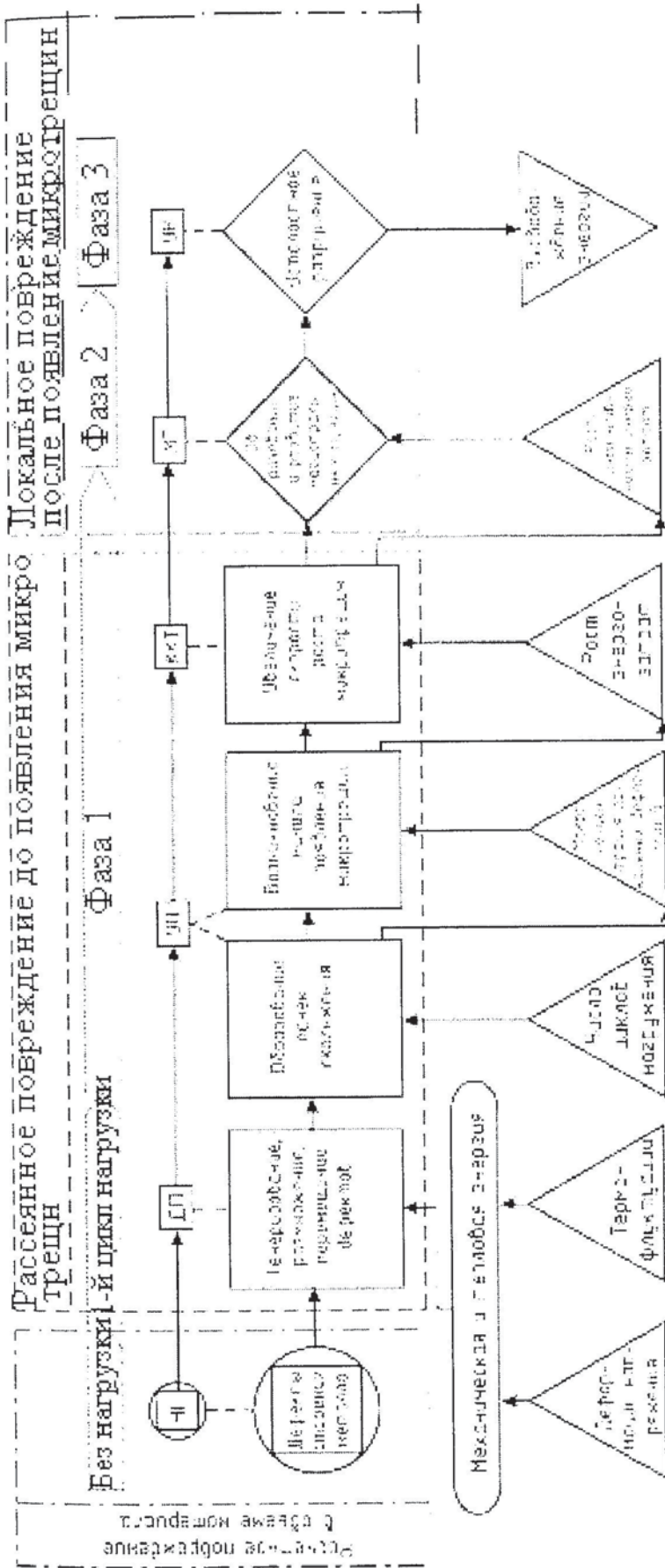


Рис. 1. Общая схема накопления усталостных повреждений и разрушения

Экспериментальные значения коэффициента рассеяния энергии до появления микротрещин и после их появления приблизительно на 30 % ниже.

В табл. 1 и 2 приведены результаты усталостных испытаний образцов из стали 45 и 40X при количестве циклов 10^7 и частоте нагружения 1,5 Гц.

В табл. 3 приведены сравнительные данные по характеристикам циклической прочности лабораторных образцов при постоянном режиме нагружения.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов, изготовленных из стали 45

Материал образцов	Диаметр образца, d , мм	Число испытанных образцов, шт.	Затрачено энергии деформации, Дж/ц	Параметры, характеризующие рассеивание энергозатрат	
				m_x	σ_T
Состояние поставки	25	5	$2,06 \cdot 10^{-9}$	0,59	250
Улучшение	25	5	$1,87 \cdot 10^{-9}$	0,56	310
Объемная закалка	25	5	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,561	420
Нормализованная	25	5	$1,92 \cdot 10^{-7}$	0,32	480

Примечание. Частота нагружения $f = 1,5$ Гц

Таблица 2

Результаты испытаний образцов, изготовленных из стали 40X

Материал образцов	Диаметр образца, d , мм	Число испытанных образцов, шт.	Затрачено энергии деформации, Дж/ц	Параметры, характеризующие рассеивание энергозатрат	
				m_x	σ_T
Состояние поставки	25	5	$0,73 \cdot 10^{-9}$	0,27	730
Улучшение	25	5	$0,64 \cdot 10^{-9}$	0,31	970
Объемная закалка	25	5	$0,47 \cdot 10^{-9}$	0,19	1420
Нормализованная	25	5	$0,58 \cdot 10^{-9}$	0,23	1530

Примечание. Частота нагружения $f = 15$ Гц

На рис. 2 показано, как изменяется напряжение изгиба (до $0,7 \sigma_T$) в зависимости от прогиба при различных числах циклов нагружения стали 45.

На рис. 3 углы наклона кривых изменения площади петли гистерезиса и поверхностной твердости от количества циклов нагружения характеризуют интенсивность изменения микротрещин.

При этом поверхностная твёрдость HRC образцов повышалась до точки перелома кривой $A_{r1} = f(N_{n0})$, последующие значения которой асимптотически снижались до HRC = 6. При этом площадь петли гистерезиса увеличивалась от $A_r = 8,3$ единиц до $A_r = 30$ единиц, в последующем она имела незначительное повышение в пределах $6,4 \cdot 10^6$ циклов. Это увеличение сохранилось от $N_{ц} = 10 \cdot 10^3$ до $N_{ц} = 10 \cdot 10^6$ циклов потом площадь петли увеличивается и происходит разрушение (рис. 3). Нижняя точка $N_{ц0}$ петли гистерезиса характеризует начало появления микротрещин. При достижении критического уровня накопленной энергии это приводит к разрушению детали.

Таблица 3

Характеристики циклической прочности лабораторных образцов

Материал образца	Режим нагрузки [τ]	Количество циклов $N_{ц} \cdot 10^6$	Затрачено энергии деформации, Дж/ц	Изменение площади петли гистерезиса относительно точки В, %
Сталь 45 в состоянии поставки	средний $0,35 \sigma_T$	$2,1 \cdot 10^3$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	0,34
Сталь 45 улучшение	тяжёлый $0,65 \sigma_T$	$1,12 \cdot 10^4$	$2,06 \cdot 10^{-7}$	2,1
Сталь 40X в состоянии поставки	средний $0,35 \sigma_T$	$1,8 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	0,42
Сталь 40X улучшение	тяжёлый $0,65 \sigma_T$	$6,6 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	1,87

Примечание. Частота нагружения $f = 15$ Гц

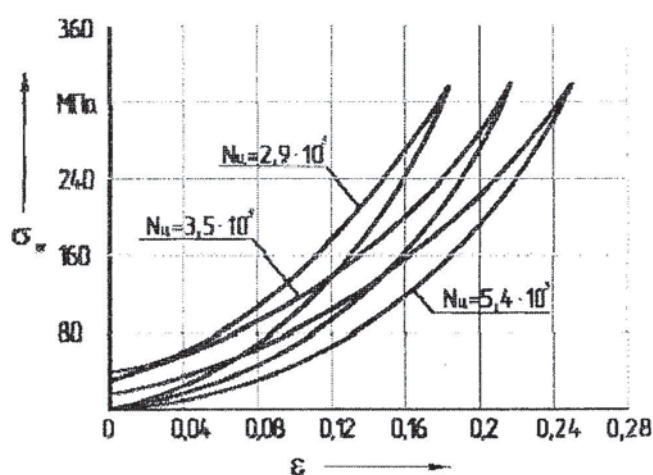


Рис. 2

Процесс усталостного разрушения материала был разбит на три фазы (рис. 1).

1. Фаза появления новых свойств материалов за счет искажения кристаллической решетки. 2. Фаза приработки граней кристаллов, когда повреждение решетки связано со

структурными изменениями в различных локальных объемах металла, распределённых по всему объёму: она заканчивается возникновением трещин. 3. Фаза развития трещин. Этот процесс более длительный и, как правило, он составляет до 70 % общего числа циклов нагружения.

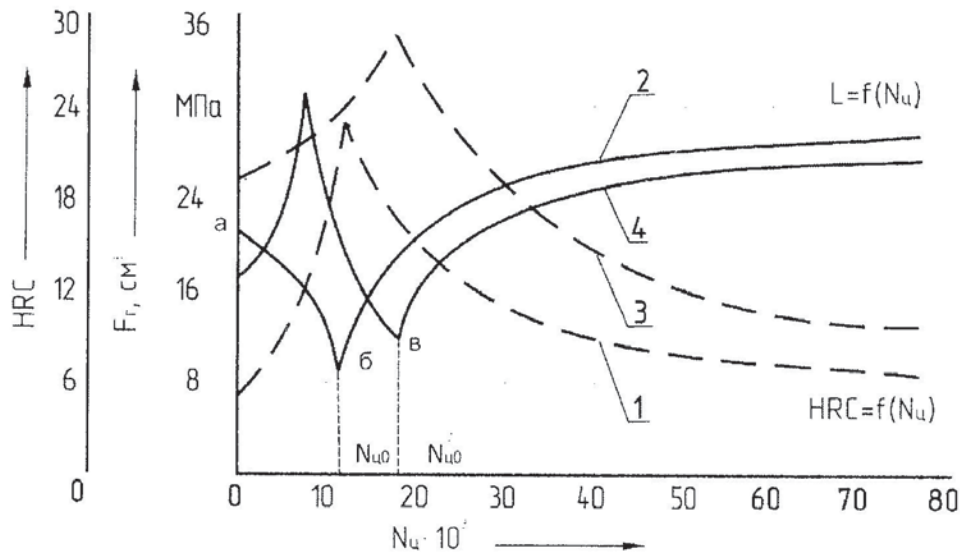


Рис. 3. Изменение площади петли гистерезиса и поверхностной твердости материала в зависимости от количества циклов нагружения и разгрузки: 1 — изменение поверхностной твердости незакаленной стали 45; 2 — изменение площади петли гистерезиса незакаленной стали 45; 3 — изменение поверхностной твердости закаленной стали 45; 4 — изменение площади петли гистерезиса закаленной стали 45

Процесс зарождения и развития трещин в третьей стадии при переменных напряжениях можно разделить на два периода. К первому периоду относятся явления образования трещин, размеры которых выходят за пределы одного зерна, а затраты энергии на деформацию образца существенно увеличиваются (угол наклона кривой изменения площади петли гистерезиса составляет более $17...19^\circ$). Второй период характерен наличием сети разветвляющихся, растущих трещин. Эти трещины являются многочисленными внутренними концентраторами, что приводит к значительно большим напряжениям, чем напряжения, послужившие причиной возникновения первой трещины. Теоретическое определение напряжений в детали основано на предположении об однородности и неразрывности материала, т. е. оно возможно только при условии, что трещины ещё не возникли. Такое допущение можно считать применимым к случаям переменных во времени напряжений только до возникновения микротрещин (до точки N_{u0} , рис. 3). На третьей стадии в материале происходят двойникование кристаллической решётки и развитие микротрещин. Двойники представляют собой два объема одной и той же фазы, разграниченные плоской поверхностью раздела, по отношению к которой они определённым образом ориентированы. Эту ориентацию легко представить как зеркальное отражение определённых кристаллографических плоскостей. Поверхность двойникования является границей с минимальным запасом свободной энергии и поэтому она представляет собой плоскость.

Двойники имеют вид полосы, ограниченной двумя параллельными поверхностями раздела. Поскольку рост полосок в боковом направлении сопровождается искажением плоских поверхностей раздела двойника и накоплением большего количества энергии, то двойникование происходит не легко и имеет вид тонких полосок.

Металлографический анализ (рис. 4) показал взаимосвязь между характером распространения трещин и микроструктурой материала, а также позволил оценить степень и характер пластической деформации, связанной с процессом разрушения. Эти результаты представляют интерес с точки зрения теории и практики, так как в настоящее время механизмы разрушения микроструктуры материалов изучены недостаточно полно. Процесс разрушения становится решающим при определении скорости роста микротрещин и ресурса детали.

Явление возникновения микротрещин выявлено по изменению площади петли гистерезиса в характерных точках (*а*, *б*, *в*), которые были зафиксированы с помощью электронного микроскопа (рис. 4).

В критической точке (*б*) потеря энергии приводит к двойникованию кристаллической решетки, в результате которого часть энергии освобождается. Это свидетельствует о начале появления микротрещин. При этом наблюдается снижение поверхностной твердости.

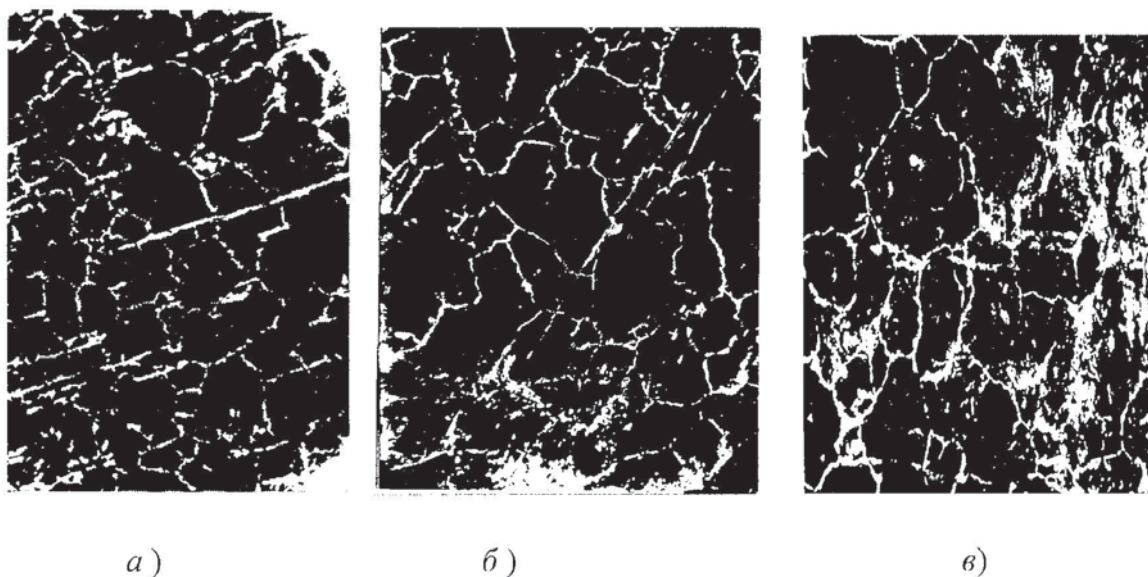
Приведенный к наиболее тяжелому режиму нагружения ресурс детали представлен в виде

$$R_t = J(N_{tt})_{пр} / k_t = J(N_{tt})_{пр} / \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_i} \right)^m, \quad (3)$$

где $J(N_{tt})_{пр}$ – приведенная затраченная энергия машины на наиболее тяжелом режиме работы.

Для частного случая накопления энергии в материале до появления микротрещин коэффициент запаса $k_{J_0} = J(N_{tt})_0^* / J(N_{tt})_0$.

Длительность режима нагружения и разгрузки детали с накоплением энергии $J(N_{tt})_0$ можно определить из уравнения кривой изменения накопленной энергии в зависимости от количества циклов (длительности действия) $J(N_{tt})_0^{*m} t_0 = J(N_{tt})_t^{0^*m} t_t$ (рис. 5).



а)

б)

в)

Рис. 4. Изменение внутренней структуры стали 45 в зависимости от количества циклов нагружения и разгрузки, N_{tt} : а — 1; б — $120 \cdot 10^3$; в — $210 \cdot 10^3$

Подставив в это уравнение $k_{J_u} J(N_u)_0 = J(N_u)_0^*$ и $k_i J(N_u)_i = J(N_u)_i^*$, получим $t_i^0 = t_0 \left(\frac{k_{J_u}}{k_i} \right)^m$. Очевидно, что приведенное (эквивалентное) время нагружения

на наиболее тяжелом режиме с накопленной энергией в материале определяется выражением

$$T_3 = t_0 + \sum_{i=1}^n t_i^0 = t_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{J_u}}{k_i} \right)^m \right], \text{ представим } t_0 \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_{J_u}}{k_i} \right)^m \right] = A.$$

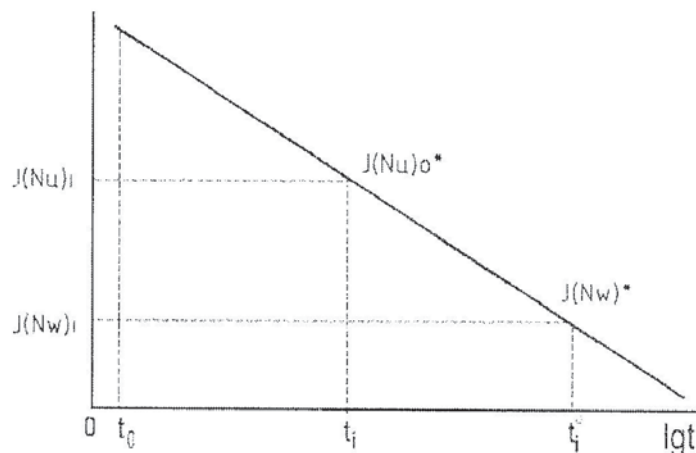


Рис. 5. Схема вычисления эквивалентных режимов нагружения

Из условия исчерпания ресурса R_i детали следует соотношение:

$$T_3 = A = R_i = \frac{J(N_u)_{np}}{\sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{k_i} \right)^m}, \quad (4)$$

откуда можно определить предельное время работы t_{np} при наибольшей нагрузке с учетом работы машины на других режимах по формуле

$$t_{0p} = R_i A^{-1}. \quad (5)$$

Очевидно, что $t_{np} < R_i$. Рассмотрим применение изложенной методики для расчета долговечности деталей, работа которых характеризуется переменным режимом нагружения. Необходимое время для выполнения одного цикла нагружения можно представить как сумму отдельных этапов работы

$$\sum t = t_p + t_\alpha + t_\tau + t_m + t_x,$$

где $\sum t$ – суммарная наработка или продолжительность нагружения от начала до окончания цикла работы; t_p – время начало нагружения; t_α – время нагружения на установившемся режиме; t_τ – время торможения; t_m , t_x – соответственно время работы машины с нагрузкой и на холостом ходу.

Предельное число циклов нагружения за срок службы детали $r = T/t_p$, где T – располагаемая продолжительность режима нагружения за время исчерпания ресурса

$$T = T_{\text{эпр}} A^{-1}, \tag{6}$$

где $T_{\text{э}} = J(N_u)_{\text{эпр}} / \sum_1^n \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^m$ – приведенное эквивалентное время движения на режиме

разгона; $J(N_u)_{\text{эпр}}$ – экспериментальная величина продолжительности накопления энергии, характеризующая предел разрушения детали; $k_i = \Pi_{\text{м}}/J(N_u)_{\text{эпр}}$ – запас прочности материала; $\Pi_{\text{м}}$ – потенциальная энергия материала; $J(N_u)_{\text{эпр}}$ – энергия, накопленная в материале при i -ом числе циклов нагружения (соответствует режиму разгона машины).

Если принять во внимание предельное число режимов нагружения, то суммарная наработка за r циклов составит

$$\sum tr = r (t_p + t_a + t_{\tau} + t_{\text{пр}} + t_{\text{с}}). \tag{7}$$

Разделив обе части равенства (7) на произведение $|t_p r| = T$ и подставив значение T из (6), получим

$$\sum tr = \frac{T_{\text{э}}}{1 + \sum_1^i \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^m} \left[1 + \frac{t_a}{t_p} + \frac{t_{\text{с}}}{t_p} + \frac{t_{\text{пр}}}{t_p} + \frac{t_{\tau}}{t_p} \right]. \tag{8}$$

В связи с тем, что продолжительность разгона и торможения машины приблизительно постоянны, отношения $t_{\text{пр}}/t_p$ и t_{τ}/t_p можно заменить постоянной величиной C .

Окончательно получаем выражение для суммарной наработки, названное «эксплуатационным ресурсом» в зависимости от режимов работы, характеристик прочности материала и длины прохода инструмента $L_{\text{сп}}$ или пробега машины, в виде

$$R_{\text{э}} = \frac{T_{\text{э}}}{\left[1 + \sum_1^i \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^m \right]} \left[1 + \frac{L_{\text{сп}} \left(1 + \frac{\vartheta_{\text{пр}}}{\vartheta_p} \right)}{\vartheta_{\text{пр}}} + C \right]. \tag{9}$$

Определение $R_{\text{э}}$ связано с тем, что при общей наработке, подсчитанной по (9), происходит исчерпание ресурса детали; обозначим в этой формуле множитель буквой B . Величина израсходованного ресурса, эквивалентного началу нагружения, определяется в виде

$$R_{\text{изр}} = \frac{\sum t_{\text{об}}}{B + \frac{L}{\vartheta_n}} \left[1 + \sum_1^i \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^m \right], \tag{10}$$

где $\sum t_{\text{об}}$ – общее время работы машины. Энергозатраты могут быть определены в виде [3]

$$J(N_u) = \int_0^t P_i dt,$$

где P_i – мгновенная мощность двигателя; t – время работы машины.

Если выразить долговечность детали в виде энергозатрат в кВт · ч при

$$J(N_u)k_n = \int_0^t P_i dt,$$

где k_n — коэффициент пропорциональности, то получим критерий, характеризующий ресурс детали, в виде

$$R_{J_0} = \left[1 + \sum_1^n 1 \left(\frac{k_1}{k_i} \right)^m \right] \frac{J(N_u)k_n}{\left[B + \frac{L}{\vartheta_\alpha} \right] \frac{P_c}{\eta_{тр}}}, \quad (11)$$

где P_c – номинальная мощность двигателя; $\eta_{тр}$ – к. п. д. привода.

Полученные зависимости показывают, что с увеличением T_0 величина R_{J_0} , при прочих равных условиях, уменьшается. Величина R_{J_0} прямо пропорциональна значению

$$\sum_1^n \left(\frac{k_1}{k_i} \right)^m.$$

Изложенный метод определения долговечности детали может быть применен и для других энергетических машин и агрегатов при составлении программ ускоренных режимов испытаний. Ресурсы отдельных деталей и узлов оказываются различными, и их оценка по предложенной методике связана с определением площади петли гистерезиса.

Нами сделана попытка уточнения показателя учета долговечности деталей машин на основе энергетического аспекта этих процессов, что способствует получению достоверных результатов испытаний машин на заводах-изготовителях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутягин П. Ю., Стрелецкий А. Н. Кинетика и энергетический баланс в механохимических превращениях // Физика твердого тела. — 2005. — Т. 47. — Вып. 5.
2. Дьяков И. Ф. Выбор материала при проектировании деталей автомобиля // Автомобильная промышленность. — 1985. — № 11. — С. 41—42.
3. А.с. N1364955 СССР МКИ G01 N3/32 Способ определения усталостного повреждения материала // И.Ф. Дьяков, Г.З. Стыльбанс № 3849119. Заявл. 21.01.85; Опубл. 8.09.87. Бюл. № 1.