

УДК 621.43.001.24: 539.4 (075.8)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ВЫНОСЛИВОСТЬ**Гоц А.Н.***ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: hotz@mail.ru*

Предложена методика расчета коэффициента влияния асимметрии переменного цикла напряжений на предельную амплитуду при расчете деталей машин на выносливость при действии нормальных и касательных напряжений. В отличие от существующих методик, в которых для расчета этих коэффициентов используется предел выносливости при пульсирующем цикле, значение которого определяется приближенно. При таком приближенном определении предела выносливости при пульсирующем цикле коэффициенты влияния асимметрии цикла для всех сталей будут одинаковыми. Предложена новая схематизированная диаграмма, основанная на данных о механических характеристиках материала, широко известных в литературе. Приведены значения коэффициентов для сталей, наиболее часто используемых при конструировании в машиностроении. Результаты расчетов основаны на данных испытаний конструктивных сталей, приведенных в зарубежных источниках.

Ключевые слова: переменные напряжения, асимметрия цикла, предельная амплитуда, коэффициент запаса прочности, коэффициент влияния асимметрии цикла

THE DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF INFLUENCE OF THE ASYMMETRY OF THE STRESS CYCLE IN THE CALCULATION OF MACHINE PARTS**Gots A.N.***Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, e-mail: hotz@mail.ru*

The methods of calculating the coefficient of influence of asymmetry of the alternating cycle stress to the maximum amplitude in the calculation of machine parts endurance under the action of normal and shear stresses. Unlike the existing methods, in which for the calculation of these coefficients is used, the fatigue limit under pulsating cycle, the value of which is determined approximately. With this approximate definition of the fatigue limit under pulsating cycle, the influence coefficients of asymmetry cycle for all steels will be the same. The proposed new schematized chart, based on data on mechanical characteristics of the material, is widely known in the literature. The values of the coefficients for steels most commonly used in the design in mechanical engineering. The results of calculations based on data from tests of structural steels given in foreign sources. Unlike the existing methods, in which for the calculation of these coefficients is used, the fatigue limit under pulsating cycle, the value of which is determined approximately. With this approximate definition of the fatigue limit under pulsating cycle, the influence coefficients of asymmetry cycle for all steels will be the same. The proposed new schematized chart, based on data on mechanical characteristics of the material, is widely known in the literature. The values of the coefficients for steels most commonly used in the design in mechanical engineering. The results of calculations based on data from tests of structural steels given in the foreign sources.

Keywords: variable voltage, cycle asymmetry, maximum amplitude, the factor of safety, factor of influence of asymmetry of the cycle

Расчет коэффициентов запаса прочности деталей поршневых двигателей при одноосном напряженном состоянии и асимметричном цикле нагружения с амплитудой σ_a и средним напряжением σ_m проводят на основании зависимостей, предложенных С.В. Серенсенем и Р.С. Кинашошвили [4]. При действии нормальных напряжений

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}, \quad (1)$$

где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений; ε_σ – масштабный фактор; β_σ – коэффициент поверхностного слоя; ψ_σ – коэффициент влияния асимметрии цикла или коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла [1].

При расчете на кручение для коэффициента запаса прочности используют аналогичную формулу с заменой σ на τ .

Иногда зависимость (1) называют коэффициентом выносливости при переменном нагружении, что не вполне корректно. Это было бы справедливо, если бы в знаменателе (1) стояло значение неприведенного напряжения, которое изменяется вовсе не по симметричному циклу, переменное рабочее напряжение.

Предельная амплитуда напряжений σ_{ra} для лабораторного образца при асимметричном цикле нагружения может быть выражена уравнением, хорошо соответствующим экспериментальным данным в диапазоне изменения коэффициента асимметрии $-1 \leq r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \leq 0,5$:

$$\sigma_{ra} = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_{rm}, \quad (2)$$

где σ_{rm} – текущее значение предельного среднего напряжения цикла.

В расчетной практике чаще для определения ψ_σ всего пользуются схематизиро-

ванной диаграммой предельных амплитуд Серенсена-Кинасошвили

$$\psi_\sigma = (2\sigma_{-1} - \sigma_0) / \sigma_0, \quad (3)$$

где σ_0 – предел выносливости лабораторных образцов при пульсирующем цикле.

Поскольку значение σ_0 в справочной литературе не приводится, то рекомендуется определять ее по приближенным формулам [7]. Для сталей при изгибе и растяжении-сжатии $\sigma_0 = (1,5 \dots 1,8)\sigma_{-1}$, при кручении $\tau_0 = (1,7 \dots 2,0)\tau_{-1}$. Верхние пределы относятся к мягким сталям. Для чугуна $\tau_0 = (1,2 \dots 1,4)\tau_{-1}$. Нетрудно заметить, что при таком выборе σ_0 или τ_0 коэффициенты ψ_σ и ψ_τ будут постоянными, не зависящими от механических характеристик материала.

В работе [4] для сталей расчет ψ_σ предлагается проводить по формуле

$$\psi_\sigma = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B, \quad (4)$$

где σ_B – предел прочности, МПа.

Из (3) следует, что ψ_σ изменяется от 0,1 при $\sigma_B = 400$ МПа до 0,32 при $\sigma_B = 1500$ МПа. При кручении принимают $\psi_\tau = 0,5 \psi_\sigma$.

Между тем, значение ψ_σ и ψ_τ можно определить, построив схематизированные диаграммы предельных циклов $\sigma_{ra} = f(\sigma_{rm})$ с использованием линейной зависимости Гудмана

$$\sigma_{ra} = \sigma_{-1} (1 - \sigma_{rm} / \sigma_B), \quad (5)$$

а также параболической Гербера

$$\sigma_{ra} = \sigma_{-1} [1 - (\sigma_{rm} / \sigma_B)^2]. \quad (6)$$

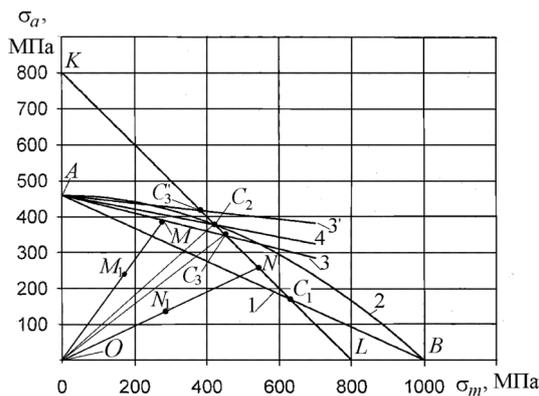


Рис. 1. Диаграмма предельных амплитуд для стали 40XН: 1 – прямая Гудмана; 2 – парабола Гербера; 3 – предельная прямая Серенсена-Кинасошвили ($\sigma_0 = 1,6\sigma_{-1}$); 3' – та же при $\sigma_0 = 1,8\sigma_{-1}$; 4 – предлагаемая прямая схематизированной диаграммы

На рис. 1 для стали 40XН (с характеристиками механической прочности в МПа: предел прочности $\sigma_B = 1000$; предел теку-

чести $\sigma_{0,2} = 800$; предел выносливости при симметричном цикле $\sigma_{-1} = 460$) построена диаграмма предельных амплитуд с использованием зависимостей (5) – прямая 1 и зависимость (6) – кривая 2.

Для деталей из пластичных материалов зависимости (5) и (6) справедливы только на некотором участке диаграммы $\sigma_{ra} = f(\sigma_{rm})$, так как опасным для них является не только усталостное разрушение, но и переход за предел текучести, что приводит к возникновению остаточных деформаций, искажающих форму и размеры детали. Поэтому максимальные напряжения циклов должны быть меньше не только предела выносливости, но и предела текучести $\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m < \sigma_{0,2}$.

Для того, чтобы исключить из диаграммы $\sigma_{ra} = f(\sigma_{rm})$ ту область, где предельное максимальное напряжение $\sigma_{rmax} = \sigma_a + \sigma_m > \sigma_{0,2}$, проведем прямую KL, отсекающую на осях координат отрезки OL и OK, равные пределу текучести (для стали 40XН $\sigma_{0,2} = 800$ МПа, рис. 1). Уравнение прямой KL имеет вид:

$$\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{0,2}. \quad (7)$$

Таким образом, для деталей из пластичных материалов диаграмма предельных амплитуд в осях координат $\sigma_a - \sigma_m$ ограничена линией 1 или параболой 2 (рис. 1) до их пересечения в точках C1 и C2 с прямой KL, а далее – прямыми C1L или C2L. Координаты точек ломаных AC1L или AC2L дают предельные значения σ_{ra} и σ_{rm} в зависимости от выбранной функции $\sigma_{ra} = f(\sigma_{rm})$.

На рис. 1 по уравнению (2) и (3) построены предельные прямые Серенсена-Кинасошвили 3 для $\sigma_0 = 1,6\sigma_{-1}$, $\psi_\sigma = 0,11$ и 3' ($\sigma_0 = 1,8\sigma_{-1}$, $\psi_\sigma = 0,25$) до пересечения их с прямой KL в точках C3 и C3' соответственно. Заметим, что предельная прямая AC3 (если принять $\sigma_0 = 1,8\sigma_{-1}$) располагается выше параболы Гербера, что противоречит результатам исследований П. Форреста [3].

Для стали 40XН, используя (4), найдем значение $\psi_\sigma = 0,22$. Предельная прямая, построенная по зависимости (2) с учетом (4), в этом случае почти совпадает с прямой 3' (рис. 1).

Построим схематизированную диаграмму, используя три точки: $\sigma_{0,2}$, σ_{-1} и координаты точки пересечения C2 (σ_{rm} ; σ_{ra}) параболы Гербера с прямой KL.

Объединим в систему зависимости (6) (парабола Гербера) и (7), после решения которой получим координаты точки C2 (σ_{rm} ; σ_{ra}):

$$\sigma_{ra} = \frac{2\sigma_{-1}\sigma_{-1} - \sigma_B^2 + \sigma_B \sqrt{\sigma_B^2 + 4\sigma_{-1}^2 - 4\sigma_{-1}\sigma_{-1}}}{2\sigma_{-1}}; \quad (8)$$

$$\sigma_{rm} = \frac{\sigma_b^2 - \sigma_b \sqrt{\sigma_b^2 + 4\sigma_{-1}^2 - 4\sigma_t \sigma_{-1}}}{2\sigma_{-1}} \quad (9)$$

Соединив точки A и $C_2(\sigma_{rm}; \sigma_{ra})$, получим новую схематизированную диаграмму OAC_2L (рис. 1), в которой тангенс угла наклона прямой AC_2 к оси абсцисс численно равен коэффициенту ψ_σ , учитывающему влияние среднего напряжения (постоянной составляющей цикла) на предел выносливости:

$$\psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{ra}}{\sigma_{rm}} = \frac{2\sigma_{-1}^2 - 2\sigma_t \sigma_{-1} + \sigma_b^2 - \sigma_b \sqrt{\sigma_b^2 + 4\sigma_{-1}^2 - 4\sigma_t \sigma_{-1}}}{\sigma_b^2 - \sigma_b \sqrt{\sigma_b^2 + 4\sigma_{-1}^2 - 4\sigma_t \sigma_{-1}}} \quad (10)$$

При расчете значения ψ_σ по формуле (10) используются только те характеристики механической прочности, которые приводятся в справочной литературе.

Формулы (8) и (9) позволяют определить, какой вид разрушения является опасным при известных рабочих средних σ_m и амплитудных σ_a напряжениях. Если при расчете деталей $\sigma_m/\sigma_a < \sigma_{rm}/\sigma_{ra}$, то рабочий цикл напряжений располагается в области OAC_2 (рис. 1) и расчет запаса прочности следует вести по зависимости (1). Если же $\sigma_m/\sigma_a > \sigma_{rm}/\sigma_{ra}$, то расчет ведется по зависимости [4, 1, 7]:

$$n_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_a + \sigma_m} \quad (11)$$

Значения отношений предельных σ_{rm}/σ_{ra} , а также коэффициентов ψ_σ , могут быть определены по формулам (8), (9) и (10) для сталей, если известны механические характеристики материалов.

В предлагаемой нами схематизированной диаграмме предельная прямая AC_2 располагается между параболой 2 и прямой 1, т. е. она удовлетворяет результатам экспериментальных данных для пластичных металлов [3, 8].

В то же время, при оценке влияния среднего касательного напряжения на сопротивление усталости в [3] отмечается, что для пластичных металлов при кручении большинство экспериментальных результатов с максимальными касательными напряжениями, не превышающими предел текучести τ_t , располагается выше параболы Гербера (6).

Если аппроксимировать зависимость предельного амплитудного касательного напряжений τ_a от среднего τ_m по результатам экспериментальных данных эллиптической зависимостью [8]

$$(\tau_{ra}/\tau_{-1})^2 + (\tau_{rm}/\tau_b)^2 = 1, \quad (12)$$

то кривая, построенная по (12), располагается выше параболы Гербера (построенной по уравнению (6) с заменой σ на τ).

На рис. 2 для стали 40ХН (с характеристиками механической прочности для касательных напряжений в МПа: предел прочности $\tau_b = 580$; предел текучести $\tau_{0,2} = 460$; предел выносливости при симметричном цикле $\tau_{-1} = 270$) построены диаграммы предельных амплитуд с использованием зависимостей: параболической Гербера (6) $\tau_{ra}/\tau_{-1} + (\tau_{rm}/\tau_b)^2 = 1$ (кривая 1) и эллиптической (12) (кривая 2).

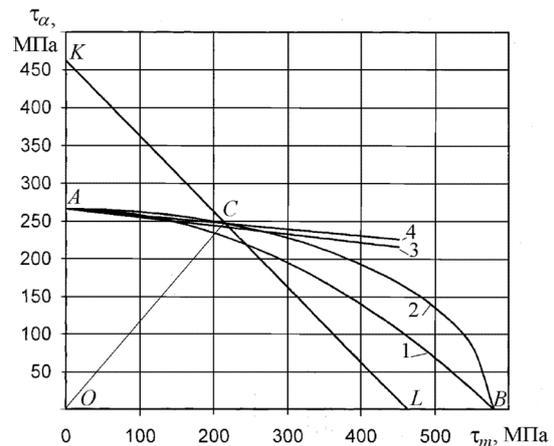


Рис. 2. Диаграмма предельных амплитуд $\tau_{ra} = f(\tau_m)$ для стали 40ХН: 1 – парабола Гербера; 2 – эллиптическая кривая; 3 – предельная прямая Серенсена-Кинасошвили ($\tau_0 = 1,8\tau_{-1}$); 4 – предлагаемая прямая схематизированной диаграммы

Точка A на оси ординат определяет значение τ_{-1} , а точка B на оси абсцисс – τ_b . Исключим из диаграммы $\tau_{ra} = f(\tau_m)$ ту область, где предельное максимальное напряжение

$$\tau_{max} = \tau_{ra} + \tau_{rm} > \tau_{0,2}.$$

Для этого проведем прямую KL , отсекающую на осях координат отрезки OL и OK , равные пределу текучести τ_t . Уравнение прямой KL имеет вид:

$$\tau_a + \tau_m = \tau_{0,2}. \quad (13)$$

Значение $\psi_\sigma, \psi_\tau, \chi_\sigma = \sigma_{rm} / \sigma_{ra}, \chi_\tau = \tau_{rm} / \tau_{ra}$ легированных сталей

Марка стали	y_s	ψ_τ	$\chi_\sigma = \sigma_{rm} / \sigma_{ra}$	$\chi_\tau = \tau_{rm} / \tau_{ra}$
5ХНСД	0,065...0,086	0,040...0,048	0,281...0,401	0,432...0,556
20Х	0,057...0,134	0,031...0,060	0,313...0,734	0,374...0,557
40Х	0,241...0,272	0,110...0,117	1,596...2,308	0,994...1,280
45Х	0,210...0,286	0,096...0,125	1,969...1,187	0,901...1,179
30ХМ	0,154...0,236	0,072...0,108	1,014...2,103	0,384...1,475
35ХМ	0,192...0,274	0,087...0,120	0,754...1,703	0,614...1,082
40ХН	0,194...0,276	0,089...0,124	1,116...2,900	0,875...1,597
40ХФ	0,175...0,270	0,021...0,082	1,420...2,559	1,485...1,116
50ХФ	0,189...0,238	0,088...0,111	1,606...2,737	1,214...1,686
38ХМЮА	0,300...0,329	0,131...0,138	2,429...2,502	1,228...1,354
12ХНЗА	0,154...0,184	0,075...0,089	0,897...1,051	0,972...1,378
20ХНЗА	0,167...0,277	0,082...0,123	0,965...2,155	1,396...1,261
37ХНЗА	0,252...0,258	0,111...0,116	1,794...2,066	1,00...1,333
18ХНВА	0,149...0,242	0,072...0,110	0,749...1,760	0,720...1,338
25ХНВА	0,247	0,111	1,695	1,140
40ХНМА	0,175...0,321	0,084...0,142	0,997...4,832	0,964...2,183
30ХГСА	0,179...0,263	0,083...0,119	1,128...2,617	0,880...1,571

После совместного решения уравнения эллиптической кривой (12) и прямой (13) определим координаты точки С их пересечения:

$$\tau_{ra} = \frac{\tau_{-1}(\tau_{-1}\tau_T + \tau_B\sqrt{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2 - \tau_T^2})}{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2}; \quad (14)$$

$$\tau_{rm} = \frac{\tau_B(\tau_B\tau_T - \tau_{-1}\sqrt{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2 - \tau_T^2})}{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2}. \quad (15)$$

Построим схематизированную диаграмму $\tau_{ra} = f(\tau_{rm})$ для касательных напряжений, соединив прямой точки А и С.

Тангенс угла наклона прямой АС (4 на рис. 2) в предлагаемой схематизированной диаграмме для касательных напряжений, численно равен коэффициенту ψ_τ :

$$\psi_\tau = \frac{\tau_{-1}(\tau_{-1}^2 + \tau_B^2 - \tau_T\tau_{-1} - \tau_B\sqrt{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2 - \tau_T^2})}{\tau_B(\tau_T\tau_B - \tau_{-1}\sqrt{\tau_{-1}^2 + \tau_B^2 - \tau_T^2})}. \quad (16)$$

На рис. 2 прямая KL, построенная по формуле (13) при $\tau_{0,2} = 460$ МПа, пересекается с эллиптической кривой 2 в точке С. На диаграмме получены две области – OAC и OCL. Если рабочие касательные напряжения τ_a и τ_m располагаются в области OAC, а $\tau_m/\tau_a \leq \tau_{rm}/\tau_{ra}$, то запас прочности определяется по формуле (1) с заменой σ на τ .

Если τ_a и τ_m располагаются в области OCL, то запас прочности равен

$$n_\tau = \frac{\tau_T}{\tau_a + \tau_m}. \quad (17)$$

В таблице приведены результаты расчетов коэффициентов ψ_σ и ψ_τ для сталей, которые широко используются в энергетическом машиностроении.

Список литературы

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

2. Гоц А.Н. Расчеты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени/А.Н. Гоц – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ; инфра-м, 2013 – 208 с.

3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: машиностроение, 1977.

4. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

5. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

6. Справочник машиностроителя в 3-х т. Т.3/под ред. С.В. Серенсена. М.: Mashgiz, 1963.

7. Справочное пособие по сопротивлению материалов // М.Н. Рудицын, П.Я. Артёмов, М.И. Любощиц; Под ред. М.Н. Рудицына. – Минск: Высшая школа, 1970. – 630 с.

8. Форрест П. Усталость металлов. Перевод с англ. Под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.

References

1. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost detalej mashin. Spravochnik. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1993. 640 p.

2. Goc A.N. Raschety na prochnost detalej DVS pri naprjazhenijah, peremennyh vo vremeni / A.N. Goc 3-e izd., ispr. i dop. M.: FORUM; infra-m, 2013 208 p.

3. Kogaev V.P. Raschety na prochnost pri naprjazhenijah, peremennyh vo vremeni. M.: mashinostroenie, 1977.

4. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost i dolgovechnost: Spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 p.

5. Kollinz Dzh. Povrezhdenie materialov v konstrukcijah. Analiz, predskazanie, predotvrashhenie: Per. s angl. M.: Mir, 1984. 624 p.

6. Spravochnik mashinostroitelja v 3-h t. T.3/pod red. S.V. Serensena. M.: Mashgiz, 1963.

7. Spravochnoe posobie po soprotivleniju materialov // M.N. Rudicyn, P.Ja. Artjomov, M.I. Ljuboshic; Pod red. M.N. Rudicyna. Minsk: Vyshejschaja shkola, 1970. 630 p.

8. Forrest P. Ustalost metallov. Perevod s angl. Pod red. S.V. Serensena. M.: Mashinostroenie, 1968. 352 p.

Рецензенты:

Кобзев А.А., д.т.н., профессор, ФГБУ ВПО «Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., профессор, главный специалист ООО «Завод инновационных технологий», КТЗ, г. Владимир.