

УДК 539.434

И.Г.Довгялло, доцент;
С.С.Макаревич, доцент;
А.Г.Капсаров, н. сотрудник;
А.В.Новик, студент БГТУ

**К ВОПРОСУ О КРИТЕРИЯХ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ТРУБОПРОВОДОВ, НАГРУЖЕННЫХ АСИММЕТРИЧНЫМ ЦИКЛОМ
ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
И ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ**

The expediency of combined criterion was determined on the basis of complex fatigue tests of thick-walled tubular samples (steel 10, 40СН, alloy D16 and copper M1) in the frequency range 0.15ц17.8 kHz. It is shown that Pisarenko-Lebedyev criterion (overestimated) and Serensen criterion (underestimated) estimate the data of the experiment. The conclusion of suggested combined criterion is given. The sphere of its preferable usage is determined (steel and copper M1). It is shown that its usage for these materials under the pressure ч 0.05ц0.2 G more exactly than Pisarenko-Lebedyev criterion.

Трубопроводы лесных машин в процессе работы одновременно подвергаются гидростатическому давлению и циклическим напряжениям, что зачастую приводит к их усталостному разрушению.

Информацию о циклической долговечности этих элементов машин традиционно получают при низкочастотных испытаниях, что связано с большими дополнительными трудовыми затратами и низкой оперативностью прогноза. В работе предпринята попытка создания уточненной гипотезы прочности, частично устраняющей эти недостатки. С этой целью нами проанализированы основные существующие теории прочности.

Как известно [1], в трубопроводах, нагруженных одновременно статическими и циклическими нагрузками в опасных сечениях, возникает неоднородное напряженное состояние с напряжениями, циклически изменяющимися во времени. Несмотря на распространенность этого вида нагружения и его изученность в общем виде, вопрос о расчете на усталостную прочность в случае трехосного напряженного состояния еще нельзя считать окончательно решенным, поскольку экспериментов, которые могли бы подтвердить правильность той или иной теории, пока еще недостаточно.

Наиболее полно при переменных напряжениях экспериментально изучено двухосное напряженное состояние. В рассматриваемом же случае в опасных точках трубопровода возникает трехосное напряженное состояние. Кроме того, реальные напряжения меняются как с малой, так и с большой частотой, а влияние широкого диапазона частот изменения напряжений на прочность материала

тоже изучено недостаточно. Поэтому для решения этой задачи нами были проведены эксперименты на полых толстостенных образцах, нагруженных внутренним гидростатическим давлением P и продольными циклическими напряжениями широкого диапазона частот.

От гидростатического давления в произвольной точке образца возникают нормальные напряжения [1] в продольном направлении G_x радиальном G_r и тангенциальном (окружном) G_t :

$$G_x = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2}, \quad G_r = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right), \quad G_t = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

где a - внутренний радиус образца; b - внешний радиус; r текущий радиус.

В использованных нами образцах $a = 2.5$ мм, $b = 4$ мм. Давление P принималось равным 12 МПа, 24 МПа, 36 МПа и 48 МПа.

Как видно из (1), в наиболее опасном состоянии от гидростатического давления находятся внутренние точки образца, для которых

$$G_x = P \frac{a^2}{b^2 - a^2}, \quad G_r = -P, \quad G_t = P \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2}, \quad (2)$$

Напряжения G_x , G_r и G_t будут главными постоянными напряжениями. Амплитудные напряжения G_a действуют только в направлении оси образца и также являются главными.

Таким образом, элемент, выделенный на внутренней поверхности образца, будет испытывать трехосное напряженное состояние с асимметричным изменением напряжений.

Нами проанализированы критерии прочности для трехосного напряженного состояния в случае асимметричных циклов и выбраны для сопоставления с экспериментом и дальнейших расчетов критерии Писаренко-Лебедева [2] и критерий Серенсена [3], которые наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к такого рода нагрузкам.

Г.С. Писаренко и А.А. Лебедев на основании большого количества опытных данных построили диаграммы предельных амплитудных напряжений при одноосном напряженном состоянии и описали их аналитической зависимостью

$$A \frac{G_a}{G_b} + \left(\frac{G_m}{G_b} \right)^{\alpha} = 1, \quad (3)$$

где G_b - временное сопротивление материала; G_m - постоянное напряжение; G_a - амплитудное напряжение; $A = G_b/G - 1$, $G - 1$ - предел выносливости при симметричном цикле, α - некоторый коэффициент, зависящий от состояния поверхности и наличия концентраторов напряжений.

Учитывая, что в использованных нами образцах отсутствовали концентраторы, и поверхность образцов была достаточно качественной, нами принято $\alpha = 1$.

Обобщая уравнение (3) на случай сложного напряженного состояния, Г.С. Писаренко и А.А. Лебедев предложили следующий критерий прочности при напряжениях, циклически меняющихся во времени по асимметричным циклам:

$$A \frac{\eta_a}{G_b} + \left(\frac{\eta_m}{G_b} \right)^A = 1, \quad (4)$$

где η_a - эквивалентное амплитудное напряжение; η_m - эквивалентное постоянное (среднее) напряжение.

Для определения эквивалентных напряжений G_a и G_m можно использовать какой-либо критерий прочности при статическом нагружении.

В работе [2] предложено использовать обобщенный критерий, согласно которому

$$\left. \begin{aligned} \eta_a &= \chi_a G_{i_a} + (1 - \chi_a) G_{1_a}, \\ \eta_m &= \chi_m G_{i_m} + (1 - \chi_m) G_{1_m}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где G_{i_a} , G_{i_m} - интенсивность амплитудных и постоянных напряжений

$$G_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \left((G_1 - G_2)^2 + (G_2 - G_3)^2 + (G_3 - G_1)^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае

$$G_{1_a} = G_a; \quad G_{2_a} = 0; \quad G_{3_a} = 0; \quad G_{1_m} = G_t; \quad G_{2_m} = G_x; \quad G_{3_m} = P. \quad (7)$$

Коэффициенты G_a и G_m , входящие в уравнение (5), определяют по формулам:

$$\begin{aligned} \chi_a &= 137(G_{-1} / \tau_{-1} - 1), \\ \chi_m &= 137(G_p / \tau_k - 1), \end{aligned}$$

где G_p , τ_k - предельные напряжения при растяжении и кручении. Учитывая, что $G_{-1} / \tau_{-1} \approx G_p / \tau_k$, можно принять $\chi_a \approx \chi_m \approx \chi$. Введем обозначения

$$\Lambda \Lambda_a = \frac{G_a}{G_b}; \quad \Lambda_m = \frac{G_m}{G_b}.$$

Тогда уравнение (4) запишется так:

$$\Lambda \Lambda_a + \Lambda_m^{\alpha A} = 1. \quad (8)$$

В уравнении (8) все величины безразмерные.

С.В. Серенсеным в наиболее удачной форме дано распространение теорий предельных напряженных состояний на напряжения, циклически изменяющиеся во времени, в общем случае трехосного напряженного состояния.

Так, С.В. Серенсеным предложено асимметричные циклы путем изменения главных напряжений приводить к эквивалентным им симметричным циклам. Приведение осуществляется исходя из условий равенства коэффициентов запаса эквивалентных симметричных циклов заданным асимметричным. Обозначая предельные максимальные напряжения эквивалентных симметричных циклов G_1^* , G_2^* , G_3^* и используя диаграмму предельных напряжений, схематизированную прямой

$$\frac{G_a}{G_{-1}} + \frac{G_m}{G_b} = 1,$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} G_1^* &= G_{1a} + \frac{G_{-1}}{G_b} G_{1m}, \\ G_2^* &= G_{2a} + \frac{G_{-1}}{G_b} G_{2m}, \\ G_3^* &= G_{3a} + \frac{G_{-1}}{G_b} G_{3m}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя значения G_1^* , G_2^* , и G_3^* согласно (9) в уравнение теории "энергии формоизменения", получим критерий усталостной прочности при сложном напряженном состоянии

$$\{1/2[(G_1^* - G_2^*)^2 + (G_2^* - G_3^*)^2 + (G_3^* - G_1^*)^2]\}^{1/2} = G_{-1}. \quad (10)$$

Сопоставим записанные критерии с экспериментальными данными. Так как в нашем случае постоянные напряжения зависят только от гидростатического давления P , то сравнение удобнее проводить не по зависимости $\Lambda_a = f(\Lambda_m)$, а по зависимости $\Lambda_a = f(\Lambda_p)$, где $\Lambda_p = P/G_b$, не зависит от принятого критерия прочности, в то время как Λ_m зависит.

Подставляя значения главных напряжений согласно (7) в формулы (8) и (10), получим:

по критерию Писаренко-Лебедева

$$\Lambda_a = \frac{1 - \beta \Lambda_p^A}{A}, \quad (11)$$

по критерию Серенсена

$$\Lambda_a = \frac{A_0}{2} (-3D\Lambda_p + 4 - 3(D\Lambda_p)^2), \quad (12)$$

$$\text{где } \beta = \left[\frac{\sqrt{3}\chi b^2 + (1-\chi)(b^2 + a^2)}{b^2 - a^2} \right]^A,$$

$$A_0 = G_1/G_b, \quad D = b^2/(b^2 - a^2).$$

По зависимостям (11) и (12) построены диаграммы предельных амплитудных напряжений в координатах $\Lambda_a - \Lambda_p$ (см. рис. 1,2). На эти же диаграммы нанесены экспериментальные точки. Как видно из рис., критерий Серенсена дает несколько заниженные значения амплитудных напряжений, а критерий Писаренко-Лебедева - завышенные.

Поэтому нами предлагается комбинированный критерий. При этом для приведения асимметричных циклов изменения главных напряжений к эквивалентным им симметричным воспользуемся диаграммой предельных напряжений, схематизированной не прямой, как у Серенсена, а кривой, записанной зависимостью, аналогичной уравнению (3)

$$B \frac{G_a}{G_b} + \left(\frac{G_m}{G_b} \right)^B = 1, \quad (13)$$

где $B = G_r/G_{-1}$, G_r - предел текучести.

Тогда приведенные главные напряжения примут значения

$$\left. \begin{aligned} G_{1_n} &= G_{1_a} + G_{-1} \left(\frac{G_{1_m}}{G_b} \right)^B, \\ G_{2_n} &= G_{2_a} + G_{-1} \left(\frac{G_{2_m}}{G_b} \right)^B, \\ G_{3_n} &= G_{3_a} + G_{-1} \left(\frac{G_{3_m}}{G_b} \right)^B. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Воспользуемся критерием Писаренко-Лебедева для симметричных циклов, заменив главные напряжения приведенными по формулам (14), т.е.

$$G_{i_n} + (1 - \chi)G_{1_n} = G_{-1}, \quad (15)$$

где G_{i_n} - интенсивность приведенных напряжений.

Подставляя в формулы (14) и (15) значения G_{1_m} , G_{2_m} , G_{3_m} и G_{1_n} и проводя преобразования, получим:

$$\Lambda_a = \frac{A_0 \{ (\Lambda_p^B F_1 - 2F_2) + [(\Lambda_p^B F_1 - 2F_2)^2 + 4F(1 - \Lambda_p^{2B} F_3 - 2\Lambda_p^B F_2 B)]^{1/2} \}}{2F}, \quad (16)$$

$$\text{где: } C_1 = \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right)^B, \quad C_2 = \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right)^B, \quad D_1 = C_1 - C_2;$$

$$D_2 = 1 + C_2; \quad D_3 = 1 + C_1; \quad F_1 = 2\chi - 1; \quad F_2 = 1 - \chi;$$

$$F_1 = 2C_1F_2^2 - \chi^2(D_1 + D_3); \quad F_3 = \frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2}{2}\chi^2 + C_1^2F_2^2.$$

На диаграммах предельных амплитудных напряжений кривые, построенные по комбинированному критерию, показаны под номером 3 и 7. Наилучшее соответствие экспериментальным данным наблюдается согласно предлагаемому комбинированному критерию для более пластичных меди М1 и стали 10, см. рис. 1. Причем это свойство комбинированного критерия для пластичных материалов сохраняется независимо от уровня асимметрии (давления) и частоты нагружения.

На рис. 1 и 2 представлены диаграммы предельных напряжений и экспериментальные кривые, построенные в координатах $\Lambda_a - \Lambda_p$. Для случая более пластичных материалов (рис. 1, а и б) комбинированный критерий предпочтительнее. Так, при $\Lambda_p = 0.1$ опасная зона согласно критерию Писаренко-Лебедева может быть оценена как $\Lambda_a \approx 0.35$ (кривая 6 на рис. 1а). Оценка по критерию Серенсена $\Lambda_a \approx 0.25$. Комбинированный критерий определяет опасную зону $\Lambda_a \approx 0.30$, а эксперимент показывает $\Lambda_a \approx 0.28$.

Т.е. расхождение между экспериментом и его оценкой по комбинированному критерию не превышает $\Lambda_a \approx 0.02$ (7 Мпа). Это, приблизительно в три раза точнее, чем критерий Писаренко-Лебедева и в два раза, чем оценка по критерию Серенсена.

Аналогичные соотношения наблюдаются и для меди М1, а также на высоких, вплоть до ультразвуковых, частотах нагружения (рис. 1а).

Близкие результаты, но на более высоких уровнях давлений мы наблюдаем и для стали 40Х и сплава Д16 (см. рис. 2, а и б).

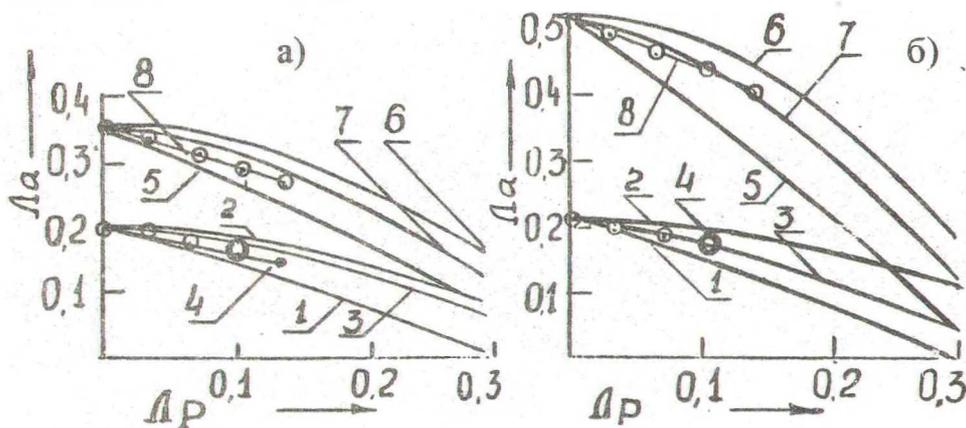


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений:

1-4 - медь М1; 5-8 - сталь 10; а - $\nu = 0,15$ кГц; б - $\nu = 17,8$ кГц; 1,5 - согласно критерию Серенсена; 2,6 - согласно критерию Писаренко-Лебедева; 3,7 - комбинированный критерий; 4,8 - значения эксперимента

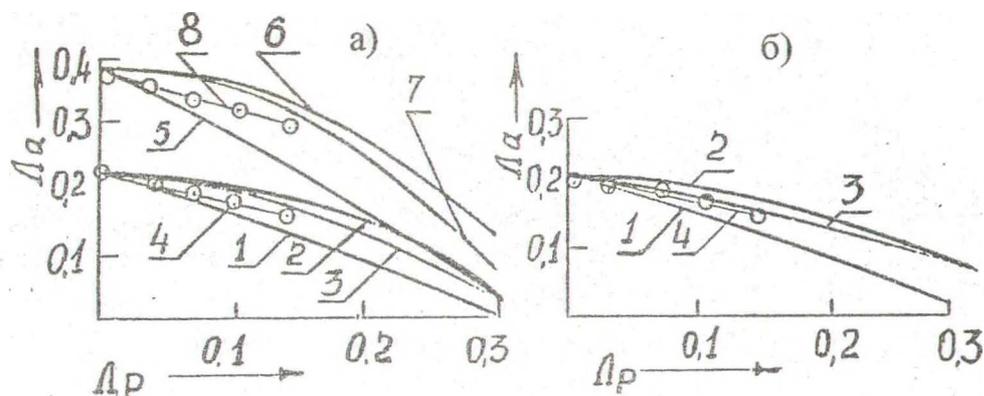


Рис.2. Диаграммы предельных напряжений:
 1-4 - сплав Д16; 5-8 - сталь 40X; а - $\nu = 17,8 \text{ кГц}$; б - $\nu = 2,8 \text{ кГц}$; 1,5 - согласно критерию Серенсена; 2,6 - согласно критерию Писаренко-Лебедева; 3,7 - комбинированный критерий; 4,8 - значения эксперимента

Проведенные исследования позволяют рекомендовать комбинированный критерий для оценки пределов усталости элементов трубопроводов, испытывающих асимметричное циклическое нагружение, вызванное дополнительной гидроднагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1968.
2. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев: Наукова думка, 1976.
3. Серенсен С.В. Об условиях прочности при переменных нагрузках для плоского и объемного напряженного состояния // Инженерный сборник, Т I, вып. 1, 1941.

УДК 539.434

И.Г.Довгялло, доцент;
 Ф.Ф.Царук, ассистент;
 С.А.Аленичев

РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Results of investigations of fatigue durability and physical and mechanical properties of steel 20X13, copper M1 and Д16, Amr2H alloy in the range frequency 0.3-18 kHz of cyclic bending are given. Then researches permit to offer the based technique of forecasting of characteristics low-frequency fatigue on results