

Увеличение суммарной АЭ и амплитуды сигналов при нагружении трубок внутренним давлением после их ультразвуковой обработки, по-видимому, связано с тем, что знакопеременные нагрузки ведут к увеличению плотности дислокаций. При этом образуется большое количество вакансий, сливающихся в дислокационные петли [3]. Одновременно с изменением структурных дефектов может меняться характер их распределения. Образуется скопление точечных дефектов и дислокаций, которые являются наиболее вероятными местами зарождения трещин. Наличие дефектов кристаллической решетки материала детали при его статическом нагружении вызывает большую АЭ, чем при таком же нагружении бездефектного образца.

**Резюме.** Проведенные исследования позволили выявить влияние высокочастотных вибраций на акустическую активность материалов при их последующем статическом нагружении внутренним давлением.

#### Л и т е р а т у р а

1. Dynegan H.L., Harris D.O., Tetelman A.S. Detection of fatigue crack growth by acoustic emission techniques. - "Materials Evaluation", 1970, v.28, N10.
2. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М., 1976.
3. Акулов Н.С., Морозов И.М. К теории усталостного разрушения металлов. - В сб.: Физика неразрушающего контроля. Минск, 1974.

УДК 620.171.3:534-8

И.Г. Довгялло, канд.техн.наук,  
В.И. Борд, канд.техн.наук

#### К РАСЧЕТУ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В условиях развития современной техники для лесной промышленности одним из типичных случаев нагружения деталей является сочетание статических и динамических (колебательных) нагрузок, что обуславливает сложно-напряженное состояние материалов.

Сочетание переменных напряжений (при различных спектрах частот) и статических одноосных, двухосных и трехосных напряженных состояний (коленчатые валы, трубы, цилиндры, ка-

меры сгорания двигательных установок и др.) выдвигает необходимость учета характеристик прочности при сложном нагружении, расчет которых часто выполняется по данным, не соответствующим реальным условиям эксплуатации и приводящим вследствие этого, к значительным ошибкам.

Успешное решение этой важной задачи невозможно без всестороннего исследования напряженного состояния материалов при воздействии на него многокомпонентных нагрузок в различных сочетаниях.

Настоящая работа и посвящена теоретическому и экспериментальному рассмотрению частного случая сложно-напряженного состояния ряда материалов, создаваемого одновременным действием крутящего момента, внутреннего давления и высокочастотных (17,6 кГц) продольных вибраций.

Согласно [1] для расчета на прочность при переменных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния можно использовать теории, полученные путем обобщений теорий предельных напряженных состояний при напряжениях, постоянных во времени.

Для исследуемого конкретного сложного напряженного состояния при переменных напряжениях были проанализированы две теории прочности: теория "энергия формоизменения" (теория Губера-Мизеса-Генки) и упрощенная теория Мора. Преобразование их к случаям изменения напряжений по асимметричным циклам производилось по методике, предложенной Серенсеном [2].

Необходимо отметить, что в большинстве существующих расчетов принят ряд упрощающих гипотез. В их число, в частности, включается гипотеза об отсутствии наследственных явлений, способных проявить себя в рассматриваемом деформировании [3...4], идея которых по существу сводится к отрицанию влияния предшествующего нагружения на дальнейшее поведение металла.

При таком предположении из поля зрения выпадают материалы, претерпевшие пластические деформации, в результате которых возникают определенные ориентации строения и накапливаются запасы внутренней энергии.

Развивающиеся теории прочности и пластичности, а также выдвигаемые практические задачи требуют самого серьезного подхода к изучению этого вопроса.

К настоящему времени имеется сравнительно ограниченное число исследований по влиянию предварительной деформации на усталостную прочность.

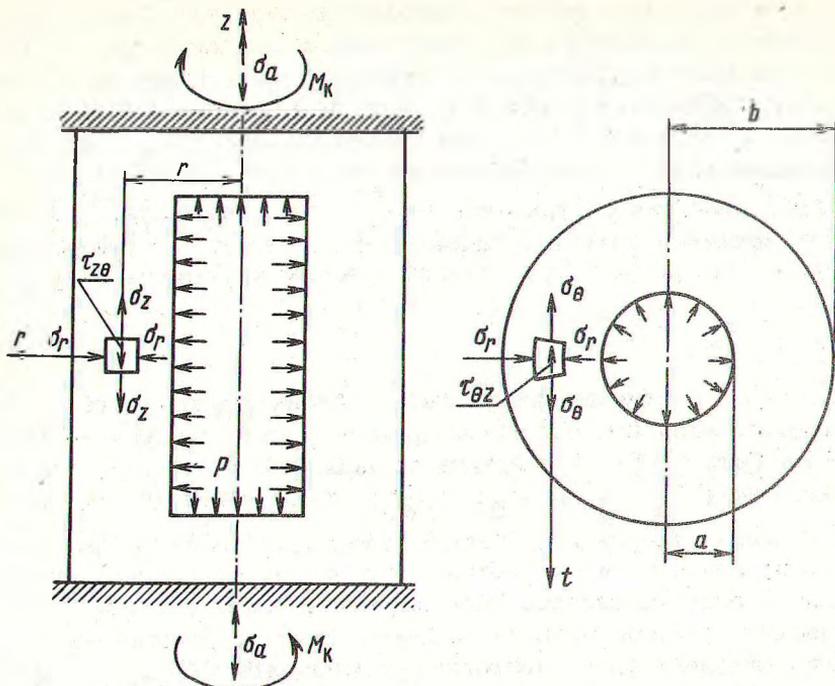


Рис. 1. Расчетная схема нагружения элемента конструкции при действии многофакторных механических нагрузок.

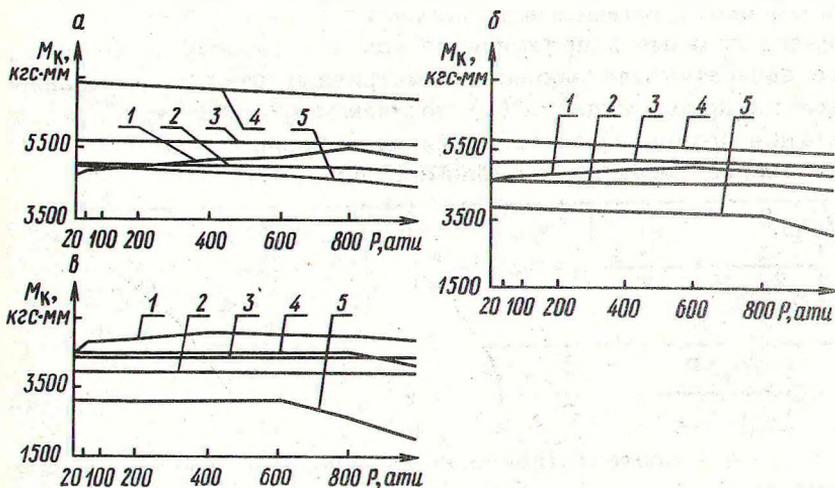


Рис. 2. Сопоставление расчетных значений разрушающего крутящего момента с экспериментальными данными для стали 40X в зависимости от величины внутреннего гидростатического давления: а -  $A_0 = 0$ ; б -  $A_0 = 12$  мкм; в -  $A_0 = 20$  мкм; 1 - опытные данные; 2 - по теории "энергии формоизменения" ( $\tau_K$ ); 3 - по теории "энергии формоизменения" ( $S$ ); 4 - по упрощенной теории Мора ( $G_B$ ); 5 - по упрощенной теории Мора ( $G_4$ ).

В работе сделана попытка приблизить теоретические расчеты сложного напряженного состояния к практическим данным, используя существующие гипотезы прочности, на основе введения "вторичных" кривых усталости для определения эквивалентных напряжений, которые приравнивались не к пределу выносливости ( $\sigma_{-1}$ ) недеформированного материала, а к предложенной новой характеристике ( $\sigma_{-1}^*$ ), представляющей собой предел высокочастотной усталости предварительно деформированного до предела текучести статическим кручением материала, т.е.

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sigma_{-1}^* \quad (1)$$

По граням криволинейного шестигранника, выделенного из цилиндрического элемента конструкции на расстоянии  $r$  от оси образца (рис. 1), будут действовать нормальные и касательные напряжения ( $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  и  $\tau_{z\theta}$ ), определяемые по известным формулам теории упругости. В результате такого нагружения главные площадки оказываются направленными под некоторыми углами к осям симметрии образца, и все главные напряжения изменяются по асимметричным циклам. Причем напряжение  $\sigma_z$  будет складываться из постоянного напряжения  $\sigma_{z(m)}$ , возникающего от внутреннего давления  $P$  (получаемого из условия  $\epsilon_z = 0$ ), и переменного напряжения  $\sigma_a^*$ , возбуждаемого высокочастотными колебаниями.

Найдя главные напряжения из условий равенства коэффициентов запаса эквивалентных симметричных циклов, заданным асимметричным, согласно (1) получим выражение условия наступления предельного состояния для нашего случая:

по теории "энергии формоизменения"

$$\sqrt{\left[ \frac{P^2 a^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} (1 - 2\mu) - \sigma_a^* \right]^2 + \left[ \sqrt{3} \frac{P^2 a^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \cdot \frac{b^2}{r^2} \right]^2} + 3 \left[ \frac{2M_k \cdot r}{\pi(b^4 - a^4)} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \right]^2 = \sigma_{-1}^* \quad (2)$$

где  $a, b$  - соответственно внутренний и наружный радиусы цилиндра;  $\mu$  - коэффициент поперечной деформации;  $\sigma_0$  - опасное напряжение;

по упрощенной теории Мора для всех возможных вариантов распределения главных напряжений

$$\frac{P_a^2}{2(b^2 - a^2)} \left[ 1 - 2\nu + 2\mu + \frac{b^2}{r^2}(1 + 2\nu) \right] \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} + \frac{\sigma_a^*}{2} +$$

$$+ \frac{1}{2} \sqrt{\left[ \frac{P_a^2}{b^2 - a^2} (1 - 2\mu + \frac{b^2}{r^2}) \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} - \sigma_a^* \right]^2} + \left[ \frac{4M_k \cdot r}{\pi(b^4 - a^4)} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \right]^2 =$$

$$= \sigma_{-1}^* \quad (\text{при } \sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = \sigma_{\min}; \sigma_3 = \sigma_r); \quad (3)$$

$$\left[ \frac{P_a^2}{2(b^2 - a^2)} (1 + 2\mu + \frac{b^2}{r^2}) \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} + \frac{\sigma_a^*}{2} \right] (1 - \nu) +$$

$$+ \frac{1 + \nu}{2} \sqrt{\left[ \frac{P_a^2}{b^2 - a^2} (1 - 2\mu + \frac{b^2}{r^2}) \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} + \sigma_a^* \right]^2} +$$

$$+ \left[ \frac{4M_k \cdot r}{\pi(b^4 - a^4)} \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \right]^2 = \sigma_{-1}^* \quad (4)$$

(при  $\sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = \sigma_r; \sigma_3 = \sigma_{\min}$ );

$$\frac{P_a^2}{2(b^2 - a^2)} \left[ 2 - \nu - 2\mu\nu - \frac{b^2}{r^2}(2 + \nu) \right] \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} + \nu \frac{\sigma_a^*}{2} +$$

$$+ \frac{\nu}{2} \sqrt{\left[ \frac{P_a^2}{b^2 - a^2} (1 - 2\mu + \frac{b^2}{r^2}) \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} + \sigma_a^* \right]^2} +$$

$$+ \left[ \frac{4M_k \cdot r}{\pi(b^4 - a^4)} \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_0} \right]^2 = \sigma_{-1}^* \quad (5)$$

(при  $\sigma_1 = \sigma_r; \sigma_2 = \sigma_{\max}; \sigma_3 = \sigma_{\min}$ ),

где  $\nu = \frac{\sigma}{\tau} = -1$ .

Из выражений (2) - (5) при заданных значениях внутреннего гидростатического давления и высокочастотных вибраций ол-

ределялись предельные величины разрушающих крутящих моментов в предположении, что опасное состояние наступает при

$$\sigma_0 = \sigma_T, \sigma_0 = \sigma_B, \sigma_0 = S, \tau_0 = \tau_T, \tau_0 = \tau_K,$$

где  $\sigma_T, \tau_T$  - пределы текучести при растяжении и кручении;  $\sigma_B$  - предел прочности при растяжении;  $S$  и  $\tau_K$  - истинные пределы прочности при растяжении и кручении.

Анализ результатов исследований образцов (наружный диаметр - 8 мм, внутренний - 5 мм), находящихся под действием внутреннего гидростатического давления ( $P$ ), крутящего момента ( $M$ ) и высокочастотных вибраций (амплитуда колебаний  $A$ )<sup>к</sup>, показал сравнительно хорошее совпадение опытных и расчетных данных для всех исследуемых материалов (сталь 40Х, конструкционный сплав Д16, медь М1).

На рис. 2, а, б, в в качестве примера представлены сопоставления расчетных значений разрушающего крутящего момента с экспериментальными данными для стали 40Х.

Из графиков видно, что почти во всех случаях при одном статическом нагружении опытные точки легли между кривыми изменения крутящего момента, построенными по теории "энергии формоизменения" ( $\sigma_0 = \tau_K$  и  $\sigma_0 = S$ ) и упрощенной теории Мора ( $\sigma_0 = \sigma$  и  $\sigma_0 = \tau_K$ ). Однако результаты опытов больше соответствуют теории "энергии формоизменения".

Аналогичное положение сохранялось и при наложении ультразвукового поля, причем с увеличением амплитуды наблюдалась тенденция к уменьшению значений разрушающего крутящего момента по сравнению с экспериментальными данными.

Подобная качественная зависимость наблюдалась и для образцов из сплава Д16 и меди М1.

Таким образом, проведенные исследования позволяют рекомендовать для расчетов на прочность материалов при трехосном напряженном состоянии с одновременным наложением высокочастотных вибраций теорию "энергии формоизменения" с использованием приведенных несимметричных циклов изменения главных напряжений к эквивалентным им симметричным, а также предложенной гипотезы, учитывающей в некоторой степени влияние предварительной деформации на предел усталости, приближая тем самым теоретические значения к экспериментальным (для исследуемых материалов значения  $\sigma_{-1}^*$  возросли по сравнению с  $\sigma_{-1}$  примерно на 19...25%).

Некоторые несовпадения опытных и теоретических данных при разных схемах напряженного состояния говорят о сложности

ти процессов, протекающих в металлах и сплавах под действием циклических нагрузок ультразвуковой частоты в разнообразных условиях нагружения, и требуют для более полного объяснения привлечения физической сущности рассматриваемых явлений.

Однако проведенные по предлагаемой методике расчеты дают значительно лучшее совпадение с экспериментальными данными в сравнении с ранее выполненными работами по расчету сложного напряженного состояния [5].

Резюме. Представленные теоретические и экспериментальные исследования могут быть использованы при прочностных расчетах элементов конструкций машин лесной промышленности с одновременной оценкой надежности их работы в условиях сложного нагружения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М., 1959.
2. Серенсен С.В. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., 1954.
3. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М., 1961.
4. Ильюшин А.А. Пластичность. М.-Л., 1949.
5. Довгялло И.Г. и др. К расчету напряжений при некоторых схемах сложного нагружения. - В сб.: Прочность-пластичность материалов в ультразвуковом поле. Ч.1. Минск, 1973.