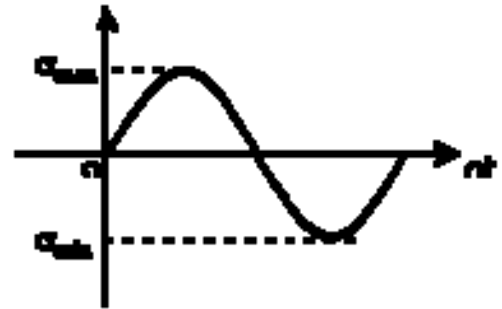


Chương 8. ỨNG SUẤT BIẾN ĐỔI THEO THỜI GIAN

I. KHÁI NIỆM VỀ HIỆN TƯỢNG MỎI CỦA VẬT LIỆU

⇒ Trong nhiều chi tiết máy hay công trình, ứng suất trên MCN biến đổi theo thời gian.

⇒ Ví dụ, khi một trục quay chịu tải trọng ngang không đổi các thớ dọc của trục luân phiên bị kéo và nén, cứ mỗi vòng quay của trục, ứng suất lại lần lượt qua các giá trị cực đại và cực tiểu (hình 8.1). Một thanh xiên của giàn cầu khi đoàn tàu chạy qua (tải trọng biến đổi) cũng lần lượt bị kéo, nén, v.v...



Hình 8.1

⇒ Các chi tiết chịu ứng suất biến đổi theo thời gian thường bị phá hỏng đột ngột không có biến dạng dư (tuy làm bằng vật liệu dẻo) và ứng suất còn rất thấp so với giới hạn bền của vật liệu. Hiện tượng đó được gọi là **hiện tượng mỏi** của vật liệu.

⇒ Hiện tượng mỏi xảy ra là do khi chịu tác dụng của ứng suất biến đổi, tuy giá trị còn thấp hơn giới hạn đàn hồi của vật liệu, những biến dạng dẻo rất nhỏ bắt đầu xuất hiện và phát triển ở những nơi yếu nhất của vật thể (ở những chỗ tập trung ứng suất do thiếu sót khi chế tạo hoặc do ảnh hưởng của môi trường) dần dần tại những chỗ đó xuất hiện những vết nứt rất bé. Những vết nứt này ngày càng sâu và phát triển trở thành những vết nứt lớn, MCN của vật thể bị thu hẹp dần và cuối cùng khi không còn đủ để chịu lực nữa thì vật thể bị phá hoại đột ngột.

⇒ Hiện tượng mỏi được đặc biệt chú ý trong kỹ thuật. Chừng 90% các chi tiết máy bị hỏng do nguyên nhân mỏi. Vì thế, khi tính toán các chi tiết chịu ứng suất biến đổi, cần kiểm tra **độ bền mỏi** của chúng.

II. CHU TRÌNH ỨNG SUẤT VÀ GIỚI HẠN MỎI

1. Chu trình ứng suất

⇒ Khi ứng suất p (p có thể là σ hoặc τ) biến đổi theo thời gian t sao cho: $p(t+T) = p(t)$, thì $p(t)$ được gọi là *ứng suất tuần hoàn* hoặc *ứng suất có chu kỳ*. Khoảng thời gian T được gọi là *chu kỳ ứng suất*. Quá trình biến đổi ứng suất ứng với khoảng thời gian

($t, t + T$) được gọi là *chu trình ứng suất*.

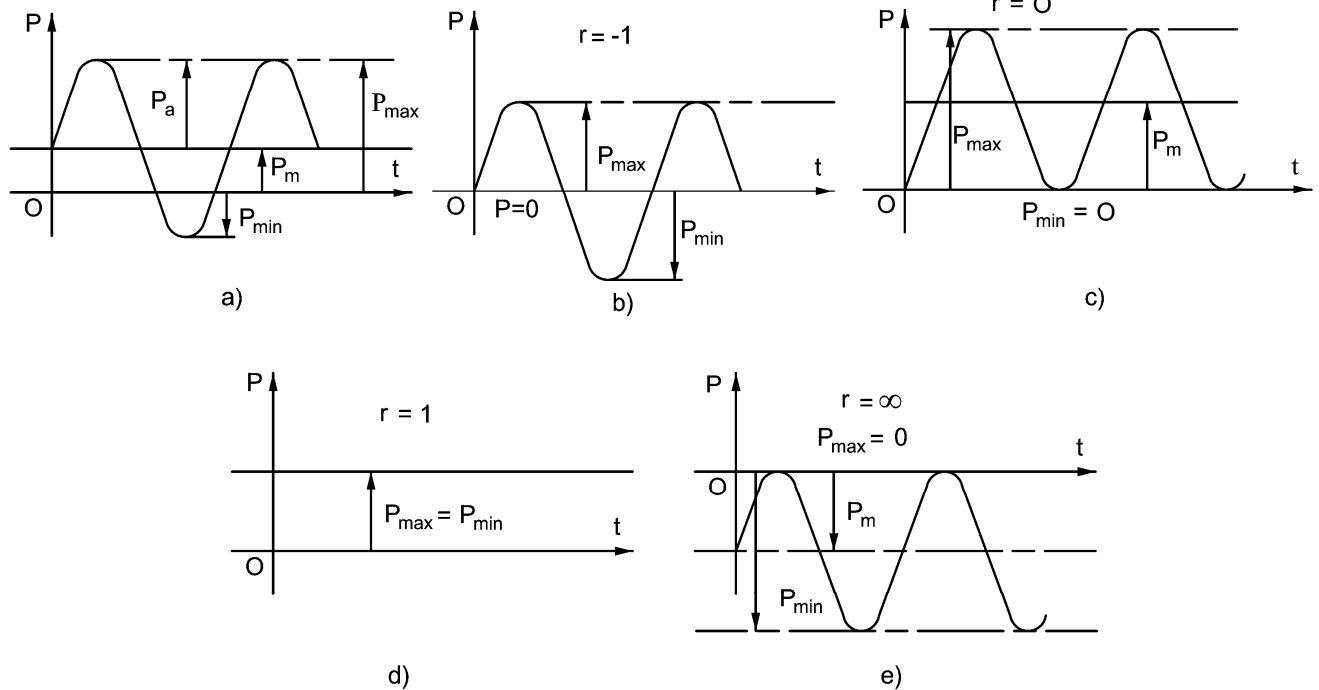
⇒ Gọi p_{\max} và p_{\min} , theo thứ tự là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của ứng suất p . Đại lượng:

$$p_m = \frac{p_{\max} + p_{\min}}{2} \quad (8.3)$$

được gọi là *ứng suất trung bình*, còn đại lượng:

$$p_a = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2} > 0 \quad (8.4)$$

được gọi là *biên độ của chu trình* hay *biên độ ứng suất*.



Hình 8.2

⇒ Từ (8.3) và (8.4), dễ thấy:

$$p_{\max} = p_m + p_a; \quad p_{\min} = p_m - p_a \quad (8.5)$$

⇒ Chu trình có $p_{\max} = p_{\min}$ (hình 8.2b) gọi là *chu trình đối xứng*.

⇒ Chu trình có $p_{\max} \neq -p_{\min}$ (hình 8.2a) - *chu trình không đối xứng*.

⇒ Chu trình có p_{\min} (hoặc p_{\max}) = 0, gọi là *chu trình mạch động*

(hình 8.2c, e). Tỷ số: $r = \frac{p_{\min}}{p_{\max}} \quad (8.6)$

gọi là *hệ số không đối xứng* của chu trình. Theo định nghĩa này:

⇒ Khi $r = -1$ (hình 8.2b) – chu trình đối xứng; $r = 1$ (hình 8.2d) – chu trình hằng (ứng suất không đổi); $r = 0$ (hình 8.2c) – chu trình mạch động (dương); $r = \infty$ (hình 8.2e) – chu trình mạch động (âm).

2. Giới hạn mỗi

⇒ Để tính độ bền mỗi của chi tiết máy, người ta phải làm các thí nghiệm để xác định *giới hạn mỗi* của vật liệu ứng với các chu trình có hệ số không đối xứng khác nhau. Đó là *giá trị lớn nhất của ứng suất tuần hoàn mà vật liệu có thể chịu đựng được với một số chu trình không hạn định và không xuất hiện vết nứt mỗi*.

⇒ Gọi N_i là số chu trình và vật liệu chịu đựng được (cho đến khi bị phá hỏng) với ứng suất p_i ; bằng thực nghiệm, người ta lập được biểu đồ $p = p(N)$ – gọi là *biểu đồ mỗi* – như hình 8.3.

⇒ Giá trị ứng suất p_r được coi là giới hạn mỗi vì đó là ứng suất lớn nhất mà vật liệu đó có thể chịu đựng được với một số chu kỳ vô hạn mà không bị phá hỏng, tức là với mọi $N > N_r$.

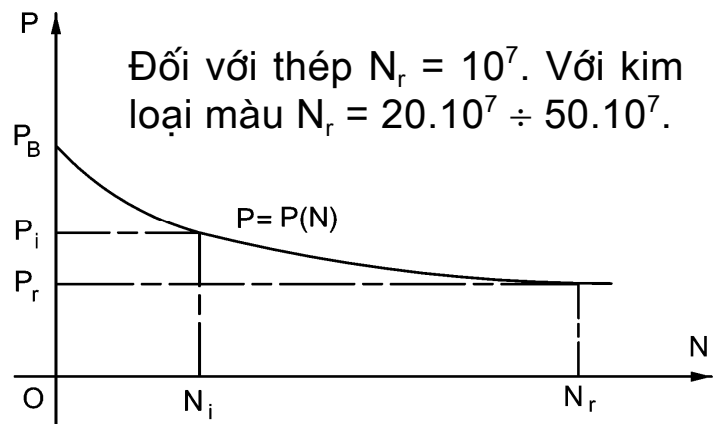
⇒ Giới hạn mỗi của vật liệu được kí hiệu với chỉ số không đối xứng r . Giới hạn mỗi uốn đối xứng của thép

thường: $\sigma_{-1}^u = 0,4\sigma_B$

⇒ Các giới hạn mỗi khi kéo nén đối xứng (σ_{-1}^{kn}) hoặc xoắn đối xứng (τ_{-1}^x) có thể tính theo công thức:

$$\sigma_{-1}^{kn} = 0,7\sigma_{-1}^u = 0,28\sigma_B; \quad \tau_{-1}^x = 0,55\sigma_{-1}^u = 0,22\sigma_B \quad (8.8)$$

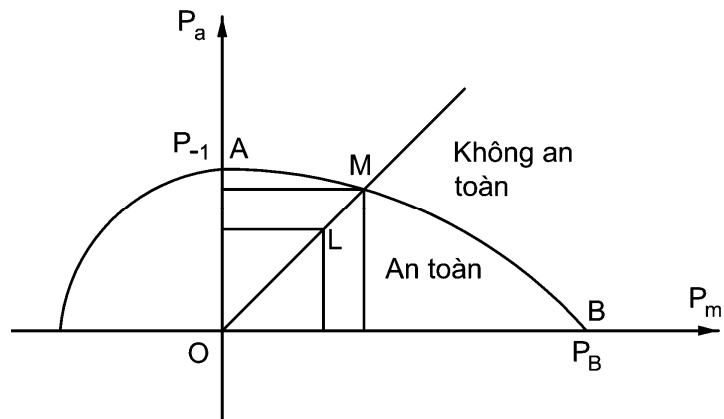
$$\Rightarrow \text{Đối với kim loại màu: } \sigma_{-1}^u = (0,25 - 0,50)\sigma_B \quad (8.9)$$



Hình 8-3

3. Biểu đồ giới hạn mỗi

⇒ Giới hạn mỗi phụ thuộc vào hệ số không đối xứng r . Với mỗi loại chu trình có thể xác định được một số giới hạn mỗi với cặp (p_a, p_m) tương ứng. Tập hợp những điểm biểu thị giới hạn mỗi trong hệ tọa độ $O p_a p_m$ gọi là *biểu đồ giới hạn mỗi* (hình 8.4).



Hình 8-4

⇒ Điểm A(P_{-1} , 0) ứng với chu trình đối xứng. Điểm B (0, p_B) ứng với chu trình hằng (p_B : giới hạn bên của vật liệu).

⇒ Xét một chu trình bất kì biểu thị bởi điểm L(p_a , p_m). Nối OL cho cắt đường cong trên biểu đồ tại điểm M(p'_a , p'_m). *Điểm M biểu thị một chu trình giới hạn có cùng một hệ số không đối xứng (hay là đồng dạng) với chu trình đã cho.*

⇒ Thực vậy, với chu trình cho trước, biểu thị bởi điểm L và với chu trình giới hạn biểu thị bởi điểm M, ta có:

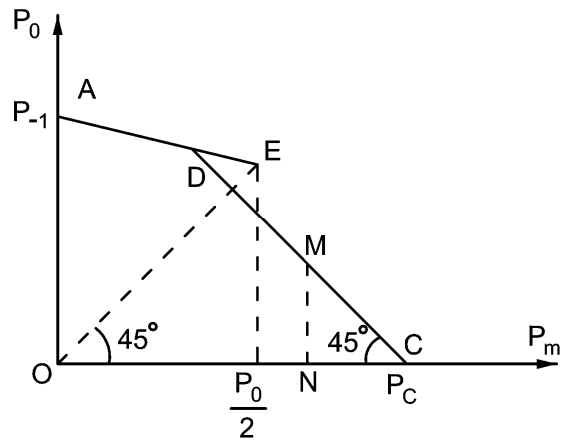
$$r = \frac{p_{\min}}{p_{\max}} = \frac{p_m - p_a}{p_m + p_a} = \frac{1 - \frac{p_a}{p_m}}{1 + \frac{p_a}{p_m}} = \frac{1 - \operatorname{tg}\theta}{1 + \operatorname{tg}\theta}; \quad r' = \frac{p'_{\min}}{p'_{\max}} = \frac{p'_m - p'_a}{p'_m + p'_a} = \frac{1 - \frac{p'_a}{p'_m}}{1 + \frac{p'_a}{p'_m}} = \frac{1 - \operatorname{tg}\theta}{1 + \operatorname{tg}\theta} = r$$

⇒ Những chu trình được biểu thị bằng những điểm nằm trên một tia vẽ từ gốc tọa độ là những chu trình đồng dạng. Tỷ số:

$$n_r = \frac{OM}{OL} = \frac{p'_m}{p_m} = \frac{p'_a}{p_a} \quad (8.10) \quad \text{được gọi là } \textit{tỷ số đồng dạng}.$$

⇒ *Tỷ số đồng dạng n_r chính là hệ số an toàn của chu trình cho trước, $n_r > 1$ - chu trình an toàn, vật liệu chưa bị phá hỏng vì mỗi, $n_r < 1$ - thì chu trình không an toàn (hình 8.4).*

⇒ Để vẽ biểu đồ giới hạn mỗi của mỗi loại vật liệu phải làm khá nhiều thí nghiệm với các loại chu trình khác nhau ⇒ thực tế, chỉ dùng những *biểu đồ giới hạn mỗi gần đúng*, được lập dựa vào một số ít kết quả thí nghiệm. Cách vẽ biểu đồ này như sau (hình 8.5):



Hình 8-5

⇒ Nối điểm A biểu thị chu kỳ đối xứng với điểm E($P_0/2$, $P_0/2$) biểu thị chu kỳ mạch động, bằng một đường thẳng, sau đó từ điểm C (0, p_c) biểu thị ứng suất tĩnh bằng giới hạn chảy, kẻ một đường thẳng làm với trục p_m một góc 45° . Hai đường thẳng trên cắt nhau tại điểm D. ADC là *biểu đồ giới hạn mỗi gần đúng*.

⇒ Những điểm nằm trên đoạn thẳng CD biểu thị chu trình giới hạn có ứng suất cực đại bằng giới hạn chảy p_c . Chẳng hạn với điểm M: $p_{\max} = p_m + p_a = ON + NM = ON + NC = p_c$

4. Các nhân tố ảnh hưởng đến giới hạn mỗi

⇒ Thực nghiệm cho thấy giới hạn mỏi không những chỉ phụ thuộc vào hệ số không đối xứng của chu trình mà còn phụ thuộc vào rất nhiều nhân tố khác nữa, như **sự tập trung ứng suất, chất lượng bề mặt, kích thước tuyệt đối của chi tiết**, v.v...

⇒ Để xét đến ảnh hưởng của các nhân tố đó, người ta dùng **hệ số thực tế α_r** là tỉ số giữa giới hạn mỏi p_{-1} của một mẫu thử có đường kính $d = 7-10\text{mm}$, bề mặt đánh bóng, với giới hạn mỏi p_{-1t}

của chi tiết thực tế:
$$\alpha_r = \frac{p_{-1}}{p_{-1t}} \geq 1 \quad (8.11)$$

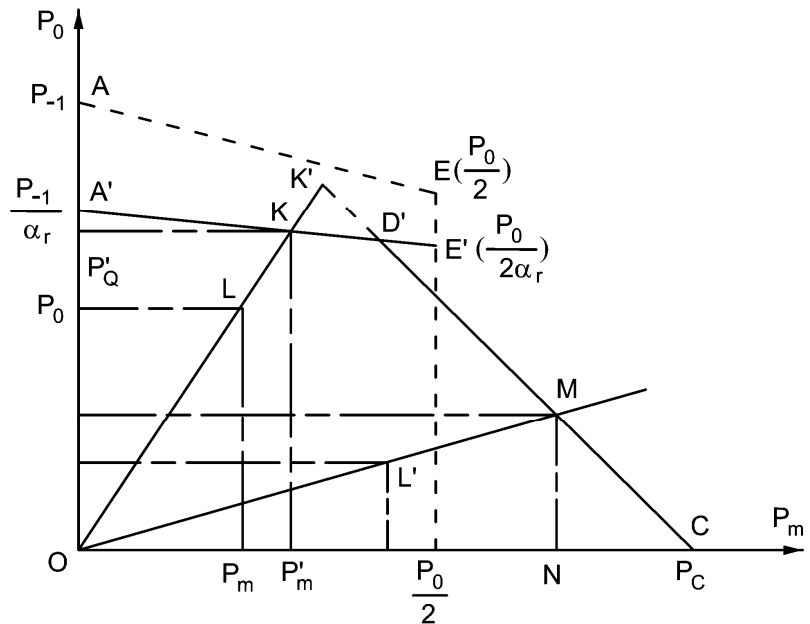
⇒ Giới hạn mỏi của một chi tiết thực tế làm việc theo chu trình đối xứng bằng:
$$p_{-1t} = \frac{p_{-1}}{\alpha_r} \quad (8.12)$$

⇒ Hệ số α_r là tích của các hệ số (các hệ số đó được xác định bằng thực nghiệm và cho trong các **Số tay kĩ thuật**): α_{tt} – xét đến ảnh hưởng của hiện tượng tập trung ứng suất (**nhân tố tập trung ứng suất làm giảm giới hạn mỏi**), α_{kt} – xét đến ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối của chi tiết (điều kiện như nhau, **kích thước càng lớn thì giới hạn mỏi càng giảm**) và α_m – xét đến ảnh hưởng của trạng thái bề mặt (**bề mặt được đánh bóng, tăng cứng làm tăng giới hạn mỏi**):

$$\alpha_r = \alpha_{tt} \alpha_{kt} \alpha_m \quad (8.13)$$

⇒ Các chu trình không đối xứng, các nhân tố nói trên chỉ ảnh hưởng đến biên độ ứng suất và hệ số ảnh

hưởng cũng giống như đối với chu trình đối xứng. Trên biểu đồ giới hạn mỏi (hình 8.6), nếu chia các tung độ của đoạn AE (giới hạn mỏi của mẫu thử) cho α_r , ta sẽ được đoạn A'E' biểu thị giới hạn mỏi của chi tiết thực.



Hình 8.6

III. CÁCH TÍNH ĐỘ BỀN MỖI

⇒ Người ta thường so sánh hệ số an toàn n_r (giữa chu trình cho trước và chu trình giới hạn đồng dạng với nó) với hệ số an toàn cho phép $[n]$ theo điều kiện:

$$\boxed{n_r \geq [n]} \quad (8.14)$$

⇒ Cách xác định hệ số an toàn n_r của các chi tiết chịu ứng suất biến đổi như sau:

1. Trường hợp kéo, nén, uốn hoặc xoắn thuần tuý

⇒ Một chu trình ứng suất bất kì được biểu thị bằng điểm L nằm trong miền OA'D'CO (hình 8.6). Nếu tia OL cắt đường giới hạn mỏi trong đoạn A'D' (điểm K) thì chu trình đã cho đồng dạng với chu trình giới hạn theo giới hạn mỏi (chi tiết bị phá hoại vì mỏi). Nếu tia OL cắt đường giới hạn mỏi trong đoạn D'C (điểm M) thì chu trình đã cho đồng dạng với chu trình giới hạn theo giới hạn chảy (chi tiết bị phá hoại vì tới giới hạn chảy).

* Trong trường hợp thứ nhất, hệ số an toàn của chu trình đã cho là: $n_r = \frac{OK}{OL} = \frac{p'_m}{p_m} = \frac{p'_a}{p_a}$. ⇒ Do đó: $p'_m = n_r \cdot p_m$; $p'_a = n_r \cdot p_a$ (a)

⇒ Toạ độ điểm K nằm trên đường thẳng A'E' thoả mãn: $p'_a = ap'_m + b$ (b)

⇒ Các hệ số a, b có thể xác định nhờ toạ độ của các điểm A', E':
tại điểm A', khi $p_m = 0$, $p'_a = p_{-1} / \alpha_r$
tại điểm E', khi $p'_m = 0,5p_0$, $p'_a = 0,5p_0 / \alpha_r$

⇒ Thay các giá trị trên vào (b), ta có: $a = -\frac{p_{-1} - 0,5p_0}{0,5\alpha_r p_0} = -\frac{\gamma}{\alpha_r}$

trong đó: $\gamma = \frac{p_{-1} - 0,5p_0}{0,5p_0} = \frac{2p_{-1} - p_0}{p_0}$; $b = \frac{p_{-1}}{\alpha_r}$ (8.15)

⇒ Như vậy, phương trình (6) có dạng: $p'_a = -\frac{\gamma}{\alpha_r} p'_m + \frac{p_{-1}}{\alpha_r}$

hay: $\gamma p'_m + \alpha_r p'_a = p_{-1}$ (c)

⇒ Thay (a) vào (c), ta được: $n_r \gamma p_m + n_r \alpha_r p_a = p_{-1}$

⇒ Từ đó rút ra hệ số an toàn n_r :

$$n_r = \frac{p_{-1}}{\gamma p_m + \alpha_r p_a} \quad (8.16)$$

* Trong trường hợp thứ hai: giả sử chu trình đã cho được biểu

thị bởi điểm L'. ằng với điểm M, ta có:

$$p'_m + p'_a = ON + NM = ON + NC = p_c \quad (d)$$

thay (a) vào (d), suy ra:
$$n_r = \frac{p_c}{p_m + p_a} \quad (8.17)$$

⇒ Vì đoạn D'C trên biểu đồ là tập hợp những điểm biểu thị giới hạn phá hỏng vì chảy nên trong công thức (8.17) không có các nhân tố ảnh hưởng đến giới hạn mới.

⇒ Như vậy trong trường hợp kéo, nén, uốn hoặc xoắn thuần túy, khi tính toán ta có hai công thức (8.16) và (8.17) tính hệ số an toàn n_r và lấy hệ số nhỏ hơn để kiểm tra theo điều kiện (8.14).

2. Trường hợp uốn và xoắn biến đổi đồng thời

⇒ Trong trường hợp uốn và xoắn biến đổi đồng thời, ứng suất pháp và ứng suất tiếp thay đổi đồng bộ, có thể áp dụng giả thuyết ứng suất tiếp lớn nhất hay giả thuyết thế năng biến đổi hình dạng lớn nhất, để suy ra công thức tính hệ số an toàn n_r như sau:

$$\frac{1}{n_r^2} = \frac{1}{n_\sigma^2} + \frac{1}{n_\tau^2}$$

hay:

$$n_r = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \quad (8.18)$$

trong đó n_σ và n_τ là các hệ số an toàn tính theo công thức (8.16) hoặc (8.17) cho biến dạng nén và biến dạng xoắn.

3. Tính trực

⇒ Các trục chuyển động như trục bánh răng hoặc bánh đai v.v... bị uốn và xoắn đồng thời, vì thế cần được kiểm tra độ bền mỏi, theo điều kiện (8.14). Hệ số an toàn của trục tại mặt cắt nguy hiểm nào đó được tính theo (8.18), trong đó n_σ và n_τ được tính theo (8.16):

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\gamma_\sigma \sigma_m + \alpha_\sigma \sigma_a}; \quad n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\gamma_\tau \tau_m + \alpha_\tau \tau_n} \quad (8.19)$$

trong đó:
$$\gamma_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}; \quad \gamma_\tau = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0} \quad (8.20)$$

⇒ Các hệ số α_σ và α_τ được xác định theo công thức (8.13). Trong một số tài liệu, công thức này được viết dưới dạng:

$$\alpha_{\sigma} = -\frac{K_{\sigma}}{\beta \varepsilon_{\sigma}}, \quad \alpha_r = \frac{K_r}{\beta \varepsilon_r} \quad (8.21)$$

trong đó: K_{σ} và K_r – hệ số tập trung ứng suất thực tế khi uốn và xoắn; β – hệ số tăng bền bề mặt; ε_{σ} và ε_r – hệ số kích thước.

⇒ Các hệ số trên đều có thể xác định nhờ bảng hay biểu đồ cho sẵn. Thông thường lấy $[n] = 1,5 \div 2,5$. Khi cần tăng cường có thể lấy $[n] = 2,3 \div 3 \Rightarrow$ có thể không cần kiểm tra độ cứng của trục.

4. Tính ổ lăn

⇒ Những ổ lăn có số vòng quay $n \geq 10$ vg/ph chịu ứng suất thay đổi, thường bị hỏng vì mỏi bề mặt tiếp xúc. Từ thí nghiệm ⇒ lập được quan hệ giữa tải trọng Q tác dụng lên ổ và tuổi thọ của ổ, biểu thị bằng số chu trình $N = 60.n.h$ (n – số vòng quay trong một phút; h – số giờ làm việc của ổ):

$$\boxed{Q(nh)^{0,3} = C} \quad (8.22)$$

⇒ C được gọi là *hệ số khả năng làm việc* của ổ lăn. Hệ số khả năng làm việc cho phép $[C]$ được cho trong các *Sổ tay kỹ thuật*.

⇒ Hệ thức (8.22) cũng có thể viết dưới dạng:

$$Q^m N = \text{hằng}; \quad m = \frac{1}{0,3} \approx 3,33 \quad (8.22')$$

⇒ æ lăn thường chịu đồng thời cả tải trọng ngang (hướng tâm) và tải trọng dọc (hướng trục) có thể không đổi hoặc thay đổi theo thời gian, êm hoặc va đập; có trường hợp vòng trong của ổ hoặc vòng ngoài của ổ quay; nhiệt độ làm việc, ... Các nhân tố đó đều ảnh hưởng đến khả năng làm việc của ổ và được xét đến khi tính tải trọng $Q \Rightarrow Q$ được gọi là *tải trọng quy ước*.

⇒ Đối với ổ *đỡ chặn*, Q được tính theo công thức kinh nghiệm:

$$Q = (RK_v + mA) K_d K_t \quad (8.23)$$

trong đó: R – tải trọng ngang; A – tải trọng dọc; m – hệ số quy đổi, quy tải trọng dọc thành tải trọng ngang; K_v – hệ số động học, nếu vòng trong quay $K_v = 1$, nếu vòng ngoài quay $K_v = 1,35$; K_d – hệ số tải trọng động, xét đến ảnh hưởng do tải trọng biến đổi; K_t – hệ số nhiệt độ, xét đến ảnh hưởng do nhiệt độ của môi trường làm việc (tra trong các *Sổ tay kỹ thuật*).

$$\text{Đối với ổ } \textit{chặn}: Q = AK_d K_t \quad (8.24)$$

$$\text{Điều kiện bền mỏi của ổ lăn là: } C \leq [C] \quad (8.25)$$

VI. NHỮNG BIỆN PHÁP NÂNG CAO GIỚI HẠN MỎI

⇒ Trên đây ta thấy giới hạn mỏi của một chi tiết phụ thuộc vào nhiều nhân tố phức tạp làm hạ thấp khá nhiều giới hạn mỏi của chi tiết.

⇒ Trong kỹ thuật ngoài việc chọn vật liệu chế tạo có độ bền cao và kết cấu nhỏ, cần rất chú trọng tìm cách nâng cao giới hạn mỏi bằng biện pháp chế tạo và công nghệ.

⇒ Khi *chế tạo*, tránh những nguyên nhân gây ra sự tập trung ứng suất, như những chỗ thay đổi mặt cắt đột ngột, những lỗ đặt chốt, then ... những vết đánh dấu trên mặt ngoài của chi tiết đôi khi cũng là nguồn gốc phát sinh những vết nứt về mỏi.

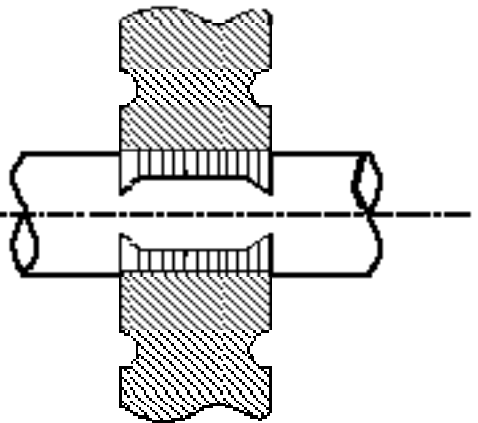
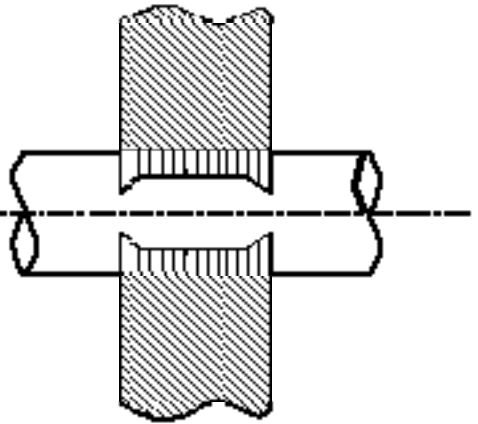
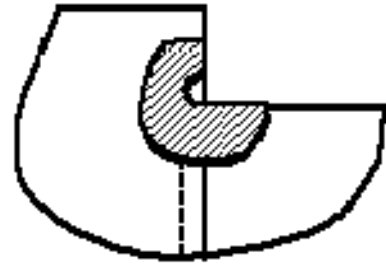
⇒ Chi tiết có những chỗ thay đổi mặt cắt đột ngột, người ta có những biện pháp nhằm giảm bớt sự tập trung ứng suất như:

* Tăng bán kính chỗ góc lượn. Để đảm bảo cho bán kính chỗ lượn đủ lớn, người ta có thể làm cho chỗ lượn lặn vào trong.

* Làm những rãnh điều hòa ứng suất giảm bớt chênh lệch đột ngột giữa hai phần có độ cứng khác nhau ⇒ hạ thấp ứng suất tập trung ở ranh giới giữa hai phần. Ví dụ, rãnh giảm ứng suất ở những chỗ ghép căng ...

⇒ Biện pháp công nghệ nhằm nâng cao chất lượng bề mặt của chi tiết, ví dụ các chi tiết chịu uốn hoặc xoắn, ứng suất ở mặt ngoài lớn nhất, sự phát sinh và phát triển những vết nứt về mỏi thường bắt đầu từ mặt ngoài ⇒ biện pháp công nghệ có một ý nghĩa đặc biệt quan trọng, những biện pháp công nghệ gồm:

- Mài nhẵn, đánh bóng hoặc mạ bề mặt chi tiết để trừ bỏ các vết nứt rất nhỏ phát sinh trong quá trình gia công.
- Làm tăng bền bề mặt bằng các phương pháp cơ học như cán bằng con lăn, phun chì, ... lên bề mặt hoặc dùng phương pháp nhiệt luyện bề mặt như thấm cacbon, nitơ, ... tôi bề mặt bằng dòng điện cao tần, ...



IV. VÍ DỤ ỨNG DỤNG

Ví dụ 1. Một trục nhỏ dạng ống của động cơ