Chương 5

LÝ THUYẾT BỀN

5.1 KHÁI NIỆM THUYẾT BỀN

Ở chương 3, chúng ta đã kiểm tra độ bền cho thanh chịu kéo hoặc nén đúng tâm (ở trạng thái ứng suất đơn). Điều kiện bền trong trường hợp này được viết như sau: $\sigma_{max} = \sigma_1 \leq [\sigma]_k$; $|\sigma_{min}| = |\sigma_3| \leq [\sigma]_n$

trong đó, ứng suất cho phép ở vế phải được tìm ra từ kết quả những thí nghiệm kéo hoặc nén. Ta đã biết:

$$\left[\text{Ứng suất cho phép}\right] = \frac{\text{Ứng suất nguy hiểm của vật liệu } (\sigma_o)}{\text{Hệ số an toàn}}$$

Ứng suất nguy hiểm:

- Đối với vật liệu dẻo là giới hạn chảy σ_{ch}
- Đối với vật liệu giòn là giới hạn bền σ_b.

Để kiểm tra độ bền ở một điểm của vật thể ở trạng thái ứng suất phức tạp (phẳng hay khối), ta cần phải có kết quả thí nghiệm phá hỏng những mẫu thử ở trong trạng thái ứng suất tương tự. Song việc thực hiện những thí nghiệm như thế rất khó khăn và phức tạp bởi vì:

- Ứng suất nguy hiểm không chỉ phụ thuộc vào độ lớn của các ứng suất chính mà còn phụ thuộc vào tỉ lệ giữa những ứng suất này. Do đó phải thực hiện một số lượng rất lớn các thí nghiệm mới đáp ứng được tỉ lệ giữa các ứng suất chính có thể gặp trong thực tế

- Thí nghiệm kéo, nén theo ba chiều đòi hỏi những thiết bị phức tạp, không phổ biến rộng rãi như thí nghiệm kéo nén một chiều

Bởi vậy, người ta không thể căn cứ vào thí nghiệm trực tiếp mà phải dựa trên các phán đoán về nguyên nhân gây ra phá hỏng và giả thiết về độ bền của vật liệu hay còn gọi là những thuyết bền. Đó là *những giả thuyết về nguyên nhân cơ bản của sự phá hoại vật liệu, không phụ thuộc vào trạng thái ứng suất của vật liệu, nhờ đó ta có thể đánh giá được độ bền của vật liệu ở mọi trạng thái ứng suất khi ta chỉ biết độ bền của vật liệu ở trạng thái ứng suất đơn.*

Nghĩa là, với phân tố ở trạng thái bất kỳ có các ứng suất chính $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, ta phải tìm ứng suất tính theo thuyết bền là một hàm của $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ rồi so sánh với $[\sigma]_k$ hay $[\sigma]_n$ ở trạng thái ứng suất đơn.

Như vậy, điều kiện bền của vật liệu có thể biểu diễn dưới dạng tổng quát như sau: $\sigma_t = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq [\sigma]_k$

Vế trái của bất đẳng thức trên được gọi là *ứng suất tính* hay *ứng suất tương đương*. Vấn đề là phải xác định hàm f hay là tìm được thuyết bền tương ứng. Độ chuẩn xác của các thuyết bền được đánh giá thông qua các kết quả áp dụng trong thực tế. Cho đến nay, người ta đã xây dựng những lý thuyết bền khác nhau, mỗi lý thuyết đề ra một quan điểm về nguyên nhân phá hoại của vật liệu. Sau đây là một vài thuyết bền tương đối phổ biến, thường được dùng trong kỹ thuật.

5.2 CÁC THUYẾT BỀN

1- Thuyết bền ứng suất pháp lớn nhất *(thuyết bền thứ nhất)*

Theo lý thuyết này, *nguyên nhân gây ra sự phá hỏng vật liệu là do ứng suất pháp lớn nhất của phân tố ở trạng thái ứng suất khối đạt tới ứng suất nguy hiểm ở trạng thái ứng suất đơn.*

Nếu ký hiệu: σ_{0k} hay σ_{0n} - ứng suất nguy hiểm về kéo và nén

n - hệ số an toàn

Ta có thể viết điều kiện bền như sau:

$$\sigma_{t1} = \sigma_1 \le \frac{\sigma_{0k}}{n} = [\sigma]_k \qquad (5.1a)$$

$$\sigma_{t1} = |\sigma_3| \le \frac{\sigma_{0n}}{n} = [\sigma]_n \qquad (5.1b)$$

trong đó: σ_{t1} - là *ứng suất tính* hay *ứng suất tương đương* theo thuyết bền thứ nhất.

Nếu ở điểm kiểm tra chỉ có ứng suất kéo hoặc ứng suất nén, ta dùng một trong hai công thức trên.

Thuyết bền ứng suất pháp cực đại tuy ra đời sớm nhất nhưng trong nhiều trường hợp, thuyết bền này không phù hợp với thực tế. Chẳng hạn, trong thí nghiệm mẫu thử chịu áp lực giống nhau theo ba phương (áp lực thủy tĩnh), dù áp lực lớn, người ta thấy hầu như vật liệu không bị phá hoại. Song theo thuyết bền thứ nhất thì vật liệu sẽ bị phá hỏng khi áp lực đạt tới giới hạn bền của trường hợp nén theo một phương. Như vậy, do còn thô sơ , không kể đến ảnh hưởng của các ứng suất khác cho nên thuyết bền này chỉ đúng đối với trạng thái ứng suất đơn.

2- Thuyết bền biến dạng dài tương đối lớn nhất *(thuyết bền thứ hai)*

Theo thuyết bền này, *nguyên nhân gây ra sự phá hỏng vật liệu là do biến dạng dài lớn nhất của phân tố ở trạng thái ứng suất khối đạt đến biến dạng dài ở trạng thái nguy hiểm của phân tố ở trạng thái ứng suất đơn.*

Gọi ε_1 là biến dạng dài tương đối lớn nhất của phân tố ở trạng thái ứng suất khối và ε_{0k} là biến dạng dài tương đối ở trạng thái nguy hiểm của phân tố bị kéo theo một phương (ở trạng thái ứng suất đơn).

Theo định luật Hooke, ta có:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}\left[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)\right] \tag{a}$$

$$\varepsilon_{0k} = \frac{\sigma_{0k}}{E} \tag{b}$$

Như vậy, *đối với phân tố ở trạng thái ứng suất đơn, nếu kể đến hệ số an toàn n, từ công thức (b) ta suy ra biến dạng dài lớn nhất phải có giới hạn là:*

$$\frac{[\sigma]}{E} = \frac{1}{n}\frac{\sigma_{0k}}{E} \tag{c}$$

Kết hợp (a) và (c), ta có thể viết công thức kiểm tra độ bền như sau:

$$\frac{1}{E}\left[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)\right] \le \frac{1}{n}\frac{\sigma_{0k}}{E} \tag{d}$$

hay là:

$$\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \le \frac{\sigma_{0k}}{n} \tag{e}$$

Gọi vế trái là ứng suất tính hay ứng suất tương đương theo thuyết bền hai và ký hiệu là σ_{t2}, ta có điều kiện bền:

$$\sigma_{t2} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \le [\sigma]_k \tag{5.2}$$

Thuyết bền biến dạng dài có tiến bộ hơn so với thuyết bền ứng suất pháp và có kể đến ảnh hưởng của cả ba ứng suất chính. Song thuyết bền này cũng không đúng trong trường hợp mẫu thử chịu áp lực theo ba phương. Thực nghiệm cho thấy thuyết bền này chỉ phù hợp với vật liệu giòn và ngày nay ít được sử dụng trong thực tế.

3- Thuyết bền ứng suất tiếp cực đại *(thuyết bền thứ ba)*

Theo thuyết bền thứ ba, *nguyên nhân gây ra sự phá hỏng vật liệu là do ứng suất tiếp lớn nhất của phân tố ở trạng thái ứng suất khối đạt tới ứng suất tiếp nguy hiểm của phân tố ở trạng thái ứng suất đơn.*

Gọi: τ_{max} - ứng suất tiếp lớn nhất của phân tố ở trạng thái ứng suất khối; τ_{0max} - ứng suất tiếp nguy hiểm của phân tố bị kéo theo một phương (ở trạng thái ứng suất đơn). Ta có điều kiện bền theo thuyết bền thứ ba:

$$\tau_{max} \le \frac{\tau_o}{n} \tag{g}$$

trong đó, theo công thức (4.25), chương 4, ta có:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_{0k} = \frac{\sigma_{0k}}{2} \tag{h}$$

Thay τ_{max} và τ_{0k} theo (h) vào (g), ta có:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \le \frac{\sigma_{0k}}{2n}$$

hay công thức kiểm tra độ bền theo thuyết bền ba:

$$\sigma_{t3} = \sigma_1 - \sigma_3 \le [\sigma]_k \tag{5.3}$$

Thuyết bền ứng suất tiếp cực đại phù hợp với thực nghiệm hơn nhiều so với hai thuyết bền trên. Tuy không kể tới ảnh hưởng của ứng suất chính σ_2 song thuyết bền này tỏ ra khá thích hợp với vật liệu dẻo và ngày nay được sử dụng nhiều trong tính toán cơ khí. Nó cũng phù hợp với kết quả mẫu thử chịu áp lực theo ba phương. Tuy vậy, đối với vật liệu có độ bền kéo và nén khác nhau, thuyết này tỏ ra không thích hợp.

4- Thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng cực đại *(thuyết bền thứ tư)*

Ở thuyết bền thứ tư, người ta cho rằng *nguyên nhân gây ra sự phá hỏng vật liệu là thế năng biến đổi hình dáng của phân tố ở trạng thái ứng suất khối đạt tới thế năng biến đổi hình dáng ở trạng thái nguy hiểm của phân tố ở trạng thái ứng suất đơn.*

Gọi u_{hd} là thế năng biến đổi hình dáng của phân tố ở trạng thái ứng suất khối và $(u_{hd})_o$ là thế năng biến đổi hình dáng ở trạng thái nguy hiểm của phân tố bị kéo theo một phương (ở trạng thái ứng suất đơn).

Ở phần 4.5 của chương 4, ta đã có:

$$u_{hd} = \frac{1+\mu}{3E}\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1\right) \tag{i}$$

$$(u_{hd})_o = \frac{1+\mu}{3E}\sigma_{0k}^2$$

Như vậy, đối với phân tố ở trạng thái ứng suất đơn, nếu kể đến hệ số an toàn n, từ công thức (i) ta suy ra thế năng biến đổi hình dáng phải có giới hạn là:

$$\frac{1+\mu}{3E}[\sigma]_k^2 \tag{k}$$

Kết hợp (i) và (k), lấy căn bậc hai của hai vế ta có thể viết công thức kiểm tra độ bền như sau:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} \le [\sigma]_k$$

hay là:

$$\sigma_{t4} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} \le [\sigma]_k \tag{5.4}$$

trong đó: σ_{t4} - là ứng suất tương đương theo thuyết bền thứ tư.

Thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng được dùng phổ biến trong kỹ thuật vì khá phù hợp với vật liệu dẻo. Thuyết này cũng tỏ ra phù hợp với thực tế, đặc biệt trong trường hợp mẫu thử chịu áp lực theo ba phương.

Ví dụ 5.1 Viết điều kiện bền theo thuyết bền ứng suất tiếp và thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng cho trạng thái ứng suất phẳng đặc biệt (H.4.17, chương 4) và trạng thái ứng suất trượt thuần túy (H.4.18, chương 4).

Giải. a) TTƯS phẳng đặc biệt có các ứng suất chính như sau:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}; \qquad \sigma_2 = 0$$

Theo thuyết bền ứng suất tiếp (5.3):

$$\sigma_{t3} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] \qquad (5.5)$$

Theo thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng (5.4):

$$\sigma_{t4} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_1 - \sigma_3\sigma_2} \leq [\sigma]$$

Ta có: $$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma] \qquad (5.6)$$

b) Đối với trạng thái ứng suất trượt thuần túy, các ứng suất chính được xác định như sau: $\sigma_1 = -\sigma_3 = |\tau|$; $\sigma_2 = 0$

Theo thuyết bền ứng suất tiếp:

$$\sigma_{t3} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2|\tau| \leq [\sigma]$$

hay: $$|\tau| \leq \frac{[\sigma]}{2} \qquad (5.7)$$

Theo thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng:

$$\sigma_{t4} = \sqrt{3\tau^2} \leq [\sigma]$$

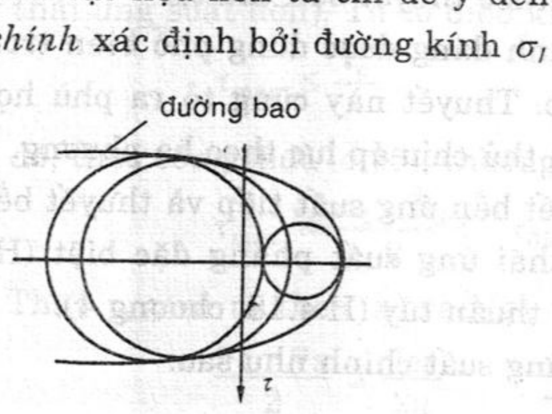
hay: $$|\tau| \leq \frac{[\sigma]}{\sqrt{3}} \qquad (5.8)$$

5- Thuyết bền về các trạng thái ứng suất giới hạn

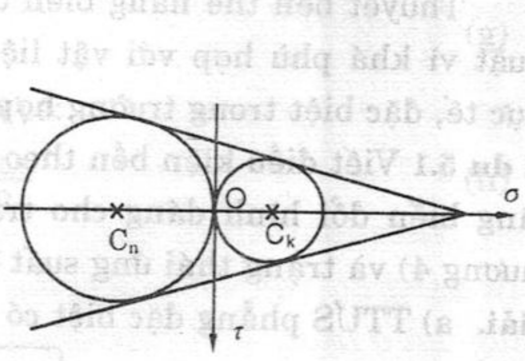
(thuyết bền thứ năm hay là thuyết bền Mohr)

Thuyết bền Mohr được xây dựng trên cơ sở các kết quả thực nghiệm, khác với các thuyết bền trước xây dựng trên cơ sở các giả thuyết.

Ở phần 4.4, chương 4, ta đã biết một trạng thái ứng suất khối với ba ứng suất chính σ_1, σ_2 và σ_3 có thể biểu diễn bằng ba vòng tròn Morh 1, 2 và 3 với đường kính tương ứng là $\sigma_2 - \sigma_3$, $\sigma_1 - \sigma_3$ và $\sigma_1 - \sigma_2$ như trên H.4.22, chương 4. Nếu vật liệu ở trạng thái nguy hiểm thì những vòng tròn tương ứng với trạng thái ứng suất nguy hiểm được gọi là những vòng tròn Mohr giới hạn. Thực nghiệm cho thấy, ứng suất pháp σ_2 ít ảnh hưởng đến sự phá hoại của vật liệu nên ta chỉ để ý đến vòng tròn Mohr lớn nhất gọi là *vòng tròn chính* xác định bởi đường kính $\sigma_1 - \sigma_3$.



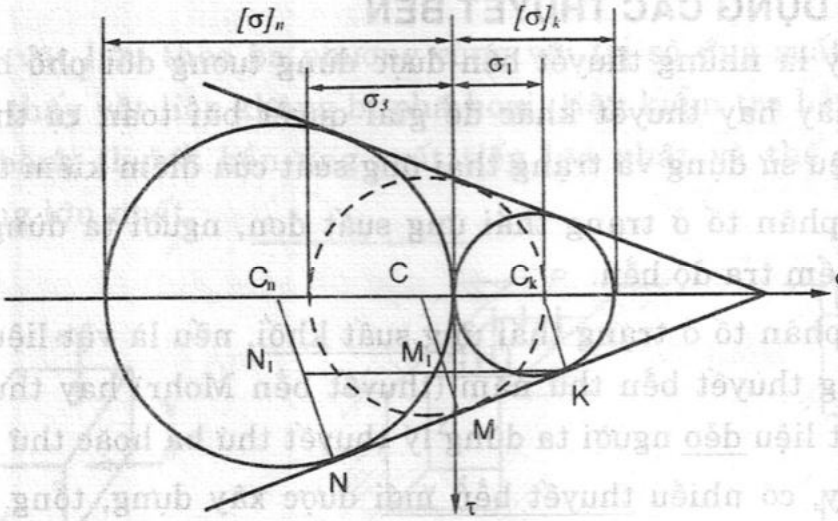
Hình 5.1 *Các vòng tròn Mohr giới hạn và đường cong giới hạn*



Hình 5.2 *Đường bao giới hạn đơn giản hóa*

Tiến hành thí nghiệm cho các trạng thái ứng suất khác nhau và tìm trạng thái giới hạn tương ứng của chúng, trên mặt phẳng tọa độ σ, τ ta vẽ được một họ các đường tròn chính giới hạn như ở H.5.1. Nếu vẽ đường bao những vòng tròn đó ta sẽ thu được một *đường cong giới hạn*, đường cong này cắt trục hoành ở điểm tương ứng với trạng thái có ba ứng suất chính là ứng suất kéo có giá trị bằng nhau. Giả thiết rằng đường bao là duy nhất đối với mỗi loại vật liệu, ta nhận thấy nếu trạng thái ứng suất nào biểu thị bằng một vòng tròn chính nằm trong đường bao thì vật liệu đảm bảo bền, vòng tròn chính tiếp xúc với đường bao thì trạng thái ứng suất đó ở giới hạn bền còn nếu vòng tròn chính cắt qua đường bao thì vật liệu bị phá hỏng.

Việc phải thực hiện một số lượng lớn các thí nghiệm để xác định các vòng tròn giới hạn và vẽ chính xác đường cong giới hạn là không đơn giản.Vì vậy, người ta thường vẽ gần đúng đường bao bằng cách dựa trên cơ sở hai vòng tròn giới hạn kéo và nén theo một phương với đường kính tương ứng là $[\sigma]_k$ và $[\sigma]_n$. Ở đây, để cho tiện ta thay thế các ứng suất nguy hiểm σ_{0k} và σ_{0n} bằng ký hiệu ứng suất cho phép $[\sigma]_k$ và $[\sigma]_n$ tức là đã có kể tới hệ số an toàn. Đường bao được thay thế bằng đường thẳng tiếp xúc với hai vòng tròn giới hạn như trên H.5.2.



Hình 5.3 *Trạng thái ứng suất giới hạn và đường bao*

Xét một trạng thái ứng suất khối có vòng tròn Mohr lớn nhất σ_1 và σ_3 tiếp xúc với đường bao, nằm ở giới hạn về độ bền. Trên H.5.3, vòng tròn này được vẽ bằng đường nét đứt. Sau đây, ta thiết lập liên hệ giữa những ứng suất chính σ_1 và σ_3 với các ứng suất cho phép $[\sigma]_k$ và $[\sigma]_n$. Từ hình vẽ ta có tỷ lệ thức: $\dfrac{NN_1}{KN_1} = \dfrac{MM_1}{KM_1}$

Thay thế các trị số:

$$NN_1 = \frac{1}{2}\left([\sigma]_n - [\sigma]_k\right); \qquad KN_1 = \frac{1}{2}\left([\sigma]_n + [\sigma]_k\right)$$

$$MM_1 = \frac{1}{2}\left(\sigma_1 - \sigma_3 - [\sigma]_k\right); \quad KM_1 = \frac{1}{2}\left([\sigma]_k - (\sigma_1 + \sigma_3)\right)$$

vào tỷ lệ thức trên, ta nhận được điều kiện giới hạn:

$$\frac{[\sigma]_n - [\sigma]_k}{[\sigma]_n + [\sigma]_k} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - [\sigma]_k}{[\sigma]_k - (\sigma_1 + \sigma_3)}$$

hoặc: $$\sigma_1 - \frac{[\sigma]_k}{[\sigma]_n}\sigma_3 = [\sigma]_k$$

Như vậy, điều kiện bền theo thuyết bền Mohr (thuyết bền thứ năm) được viết là: $$\sigma_1 - \alpha\sigma_3 \le [\sigma]_k \quad (5.9a)$$

với hệ số: $$\alpha = \frac{[\sigma]_k}{[\sigma]_n} \quad (5.9b)$$

Tuy bỏ qua ảnh hưởng của ứng suất chính σ_2 và đơn giản hóa đường cong giới hạn thành đường thẳng, thuyết bền Mohr có ưu điểm hơn những thuyết bền trên vì nó không dựa vào giả thuyết nào mà căn cứ trực tiếp vào trạng thái giới hạn của vật liệu. Thực tế cho thấy thuyết này phù hợp nhiều với vật liệu giòn, tuy nhiên nó cho kết quả chính xác chỉ khi vòng tròn giới hạn của trạng thái ứng suất đang xét nằm trong khoảng hai vòng tròn giới hạn kéo và nén.

5.3 VIỆC ÁP DỤNG CÁC THUYẾT BỀN

Trên đây là những thuyết bền được dùng tương đối phổ biến. Việc áp dụng thuyết này hay thuyết khác để giải quyết bài toán cụ thể phụ thuộc vào loại vật liệu sử dụng và trạng thái ứng suất của điểm kiểm tra.

Đối với phân tố ở trạng thái ứng suất đơn, người ta dùng thuyết bền thứ nhất để kiểm tra độ bền.

Đối với phân tố ở trạng thái ứng suất khối, nếu là vật liệu giòn, người ta thường dùng thuyết bền thứ năm (thuyết bền Mohr) hay thuyết bền thứ hai. Nếu là vật liệu dẻo người ta dùng lý thuyết thứ ba hoặc thứ tư.

Hiện nay, có nhiều thuyết bền mới được xây dựng, tổng quát hơn và phù hợp hơn với kết quả thực nghiệm. Tuy vậy, những thuyết này cũng có những nhược điểm nhất định nên chưa được sử dụng rộng rãi.

Ví dụ 5.2 Kiểm tra bền phân tố vật thể ở trạng thái ứng suất khối như trên H.5.4. Ứng suất cho theo kN/cm^2. Cho biết: $[\sigma] = 16$ kN/cm^2.

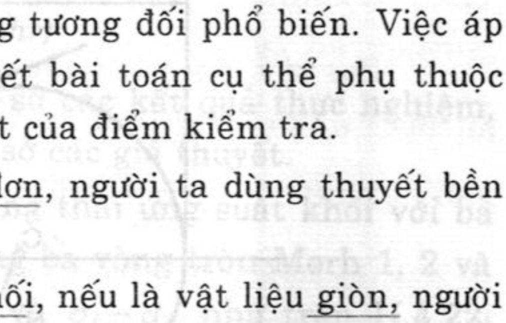
Giải. Chọn hệ tọa độ như trên H.5.4.

Theo quy ước ta có:

$$\sigma_x = -5 \text{ kN/cm}^2; \quad \sigma_y = 6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_z = 0; \quad \tau_{zy} = \tau_{yz} = 4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0; \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$$



Hình 5.4

Mặt vuông góc với trục x là mặt chính

với ứng suất chính $\sigma_x = -5\,kN/cm^2$. Hai ứng suất chính còn lại nằm trong mặt phẳng vuông góc với ứng suất chính đã cho và có giá trị bằng:

$$\sigma_{\substack{max\\min}} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2} = 3 \pm 5 = \begin{cases} 8\ kN/cm^2 \\ -2\ kN/cm^2 \end{cases}$$

Do đó: $\sigma_1 = 8\ kN/cm^2$; $\sigma_2 = -2\ kN/cm^2$; $\sigma_3 = -5\ kN/cm^2$

Theo thuyết bền ứng suất tiếp:

$$\sigma_{t3} = \sigma_1 - \sigma_3 = 8 - (-5) = 13\ kN/cm^2 < 16\ kN/cm^2$$

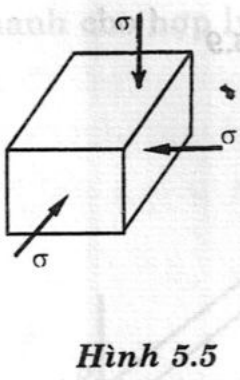
Theo thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng:

$$\sigma_{t4} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3}$$
$$= \sqrt{8^2 + 2^2 + 5^2 - (-2)\times 8 - 8(-5) - (-2)(-5)}$$
$$= 11{,}79\ kN/cm^2 < 16\ kN/cm^2$$

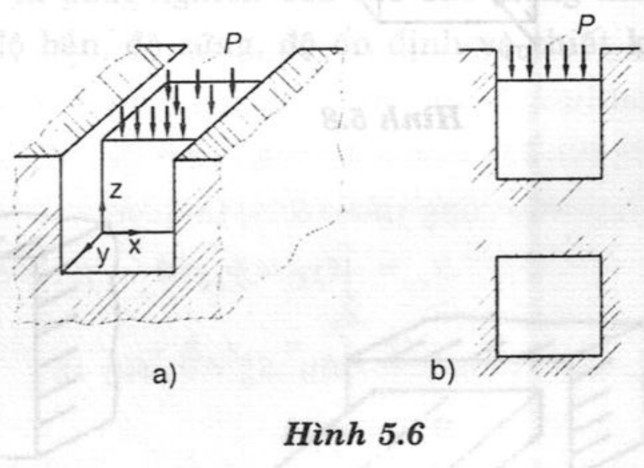
Như vậy, theo cả hai thuyết bền phân tố này đảm bảo bền.

BÀI TẬP CHƯƠNG 5

5.1 Khi nén vật liệu theo ba phương cùng với trị số ứng suất pháp (H.5.5), người ta thấy vật liệu không bị phá hoại. Hãy kiểm tra bền đối với phân tố trên bằng thuyết bền ứng suất tiếp lớn nhất và thế năng biến đổi hình dáng lớn nhất.



Hình 5.5



Hình 5.6

5.2 Dùng thuyết bền ứng suất tiếp lớn nhất để tính áp lực p lớn nhất tác dụng trên khối thép trên H.5.6. Khối thép đó được đặt khít vào trong khối thép lớn.

Cho $E = 2.10^7\ N/cm^2$; $\mu = 0{,}28$; $[\sigma] = 16\ kN/cm^2$.

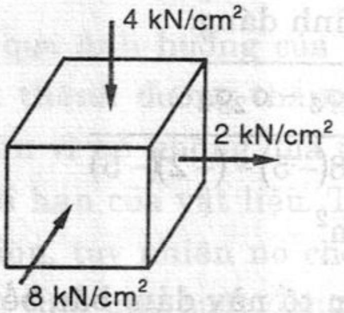
5.3 Cho trạng thái ứng suất như H.5.7. Tính ứng suất tương đương (vế trái của công thức kiểm tra bền) theo thuyết thế năng biến đổi hình dáng lớn nhất và thuyết bền Mohr. Cho $\sigma_{ok} / \sigma_{on} = 0{,}25$.

5.4 Cho trạng thái ứng suất tại một điểm của vật thể chịu lực như H.5.8:

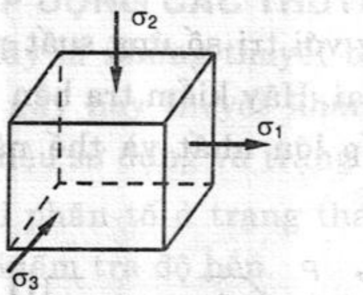
$$\sigma_1 = 20 \text{ kN/cm}^2; \ \sigma_2 = -40 \text{ kN/cm}^2; \ \sigma_3 = -80 \text{ kN/cm}^2$$

Kiểm tra độ bền theo lý thuyết bền thứ ba và thứ tư, biết $[\sigma] = 120$ kN/cm^2.

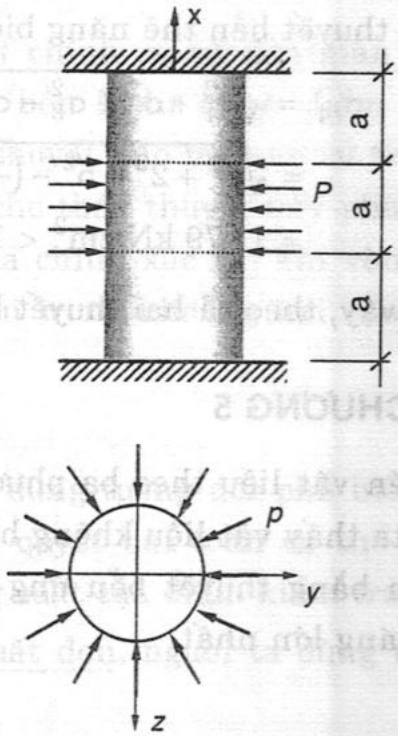
5.5 Một trụ tròn bằng thép ($\mu = 0{,}3$) đặt khít giữa hai tường cứng như H.5.9. Phần giữa của trụ chịu áp lực p phân bố đều. Tính ứng suất tương đương theo lý thuyết thế năng biến đổi hình dạng ở phần giữa và phần đầu của hình trụ.



Hình 5.7



Hình 5.8



Hình 5.9