

1. WEKTOR NAPRĘŻENIA

\bar{P}_1, \bar{P}_2 - wektory sił wewnętrznych w punktach powierzchni ΔF wokół punktu A
 $\bar{P}_i = \bar{P}_i(\bar{r}_i, \bar{v})$
 $\Delta \bar{P}$ - suma sił wewnętrznych na powierzchni ΔF

$$\Delta \bar{P} = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{P}_i = \sum_{\Delta F} \bar{P}_i$$

- ★ średnia gęstość sił wewnętrznych na powierzchni ΔF $\frac{\Delta \bar{P}}{\Delta F}$
- ★ naprężenie w punkcie A : $\bar{p} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{P}}{\Delta F}$ $\bar{p} = \bar{p}(\bar{r}, \bar{v})$ funkcja wektorowa

2. STAN NAPRĘŻENIA W PUNKCIE

- ★ zbiór wektorów naprężenia w ustalonym punkcie przy dowolnej płaszczyźnie przekroju
 $\bar{r} = \text{const} \Rightarrow \bar{p} = \bar{p}(\bar{v})$
- ★ wybieramy 3 szczególne płaszczyzny przekroju - prostopadłe do osi układu współrzędnych

$\bar{p}_i = \bar{p}_i(v_i)$ wektor naprężenia przynależny płaszczyźnie prostopadłej do osi x_i
 \bar{v}_i wersory normalne płaszczyzn prostopadłych do osi x_i

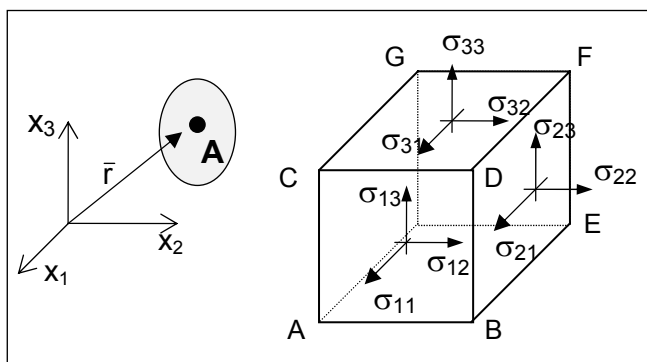
$$\bar{p}_i = \bar{p}_i(\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{i3}) \quad i = 1, 2, 3$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3), \quad i, j = 1, 2, 3$$
 funkcja skalarna 3 skalarów

- ★ macierz naprężenia

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$
 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ - naprężenia normalne, pozostałe to napr. styczne

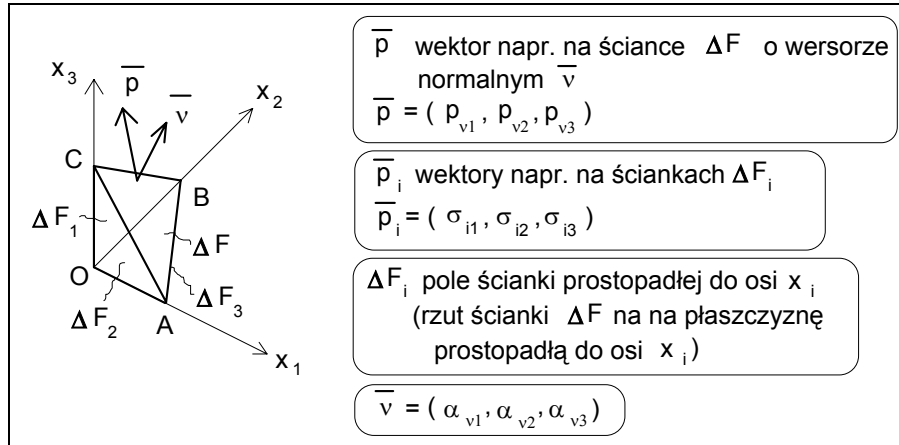
3. KONWENCJA ZNAKOWANIA NAPRĘŻEŃ



- ★ **napręż. normalne** jest dodatnie, jeżeli jest zgodnie skierowane z normalną zewnętrzną płaszczyzny
- ★ **napr. styczne** jest dodatnie, jeżeli:
 - 1) normalna zewnętrzna płaszczyzny jest zgodnie skierowana z osią układu, do której jest ona równoległa
 - 2) naprężenie styczne jest zgodnie skierowane z osią układu, do której jest ono równoległe,

lub gdy oba warunki są jednocześnie niespełnione.

4. TENSOR NAPRĘŻENIA



★ $\frac{\Delta F_i}{\Delta F} = \cos$ kąta między ściankami = \cos kąta między normalnymi do ścianek

$$\frac{\Delta F_i}{\Delta F} = \cos(\bar{v}, x_i) \Rightarrow \Delta F_i = \Delta F \cos(\bar{v}, x_i) = \Delta F \alpha_{vi}$$

★ siły działające na ściankach ΔF_i $\Delta \bar{P}_i = \bar{p}_i \Delta F_i$

★ siła działająca na ściance ΔF $\Delta \bar{P} = \bar{p} \Delta F$

★ warunek równowagi sił (zamknięty przestrzenny wielobok sił)

$$\Delta \bar{P} = \Delta \bar{P}_1 + \Delta \bar{P}_2 + \Delta \bar{P}_3 \Rightarrow \bar{p} \Delta F = \bar{p}_1 \Delta F_1 + \bar{p}_2 \Delta F_2 + \bar{p}_3 \Delta F_3$$

$$\bar{p} = \bar{p}_1 \alpha_{v1} + \bar{p}_2 \alpha_{v2} + \bar{p}_3 \alpha_{v3} \Rightarrow \begin{cases} p_{v1} = \sigma_{11} \alpha_{v1} + \sigma_{21} \alpha_{v2} + \sigma_{31} \alpha_{v3} \\ p_{v2} = \sigma_{12} \alpha_{v1} + \sigma_{22} \alpha_{v2} + \sigma_{32} \alpha_{v3} \\ p_{v3} = \sigma_{13} \alpha_{v1} + \sigma_{23} \alpha_{v2} + \sigma_{33} \alpha_{v3} \end{cases}$$

★ symetria macierzy naprężeń $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

$$p_{v1} = \sigma_{11} \alpha_{v1} + \sigma_{12} \alpha_{v2} + \sigma_{13} \alpha_{v3} \quad \text{itd.....}$$

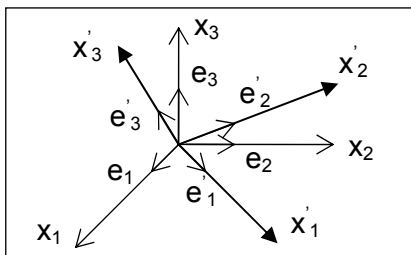
★ konwencja sumacyjna

współrzędne wektora naprężenia na ściance o normalnej \bar{v}

$$p_{vi} = \sigma_{ij} \alpha_{vj} \Rightarrow \bar{p} = \mathbf{T}_\sigma \bar{v}$$

W wyniku pomnożenia wektora przez macierz otrzymujemy wektor, a zatem **macierz naprężenia musi być tensorem**.

5. TRANSFORMACJA TENSORA NAPRĘŻENIA



$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}'_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma'_{11} & \sigma'_{12} & \sigma'_{13} \\ \sigma'_{12} & \sigma'_{22} & \sigma'_{23} \\ \sigma'_{13} & \sigma'_{23} & \sigma'_{33} \end{bmatrix}$$

★ macierz przejścia

$$\alpha_{ij} = \cos(\bar{e}'_i, \bar{e}_j)$$

I wiersz $\alpha_{11} = \cos(\bar{e}'_1, \bar{e}_1)$ $\alpha_{12} = \cos(\bar{e}'_1, \bar{e}_2)$ $\alpha_{13} = \cos(\bar{e}'_1, \bar{e}_3)$

I kolumna $\alpha_{11} = \cos(\bar{e}'_1, \bar{e}_1)$ $\alpha_{21} = \cos(\bar{e}'_2, \bar{e}_1)$ $\alpha_{31} = \cos(\bar{e}'_3, \bar{e}_1)$

1. wiersze macierzy przejścia to współrzędne wersorów nowego układu wyrażone w ukł. starym
2. kolumny macierzy przejścia to współrzędne wersorów starego układu wyrażone w ukł. nowym
3. macierz ortonormalna wzg. wierszy i kolumn, tzn.

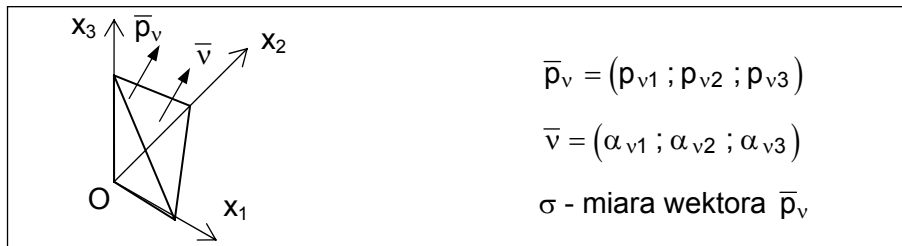
$$\left. \begin{matrix} \alpha_{ik} & \alpha_{jk} \\ \alpha_{ki} & \alpha_{kj} \end{matrix} \right\} = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

4. prawo transformacji

$$\sigma'_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{jl} \sigma_{kl}$$

6. NAPRĘŻENIA GŁÓWNE

Poszukujemy takiej płaszczyzny przechodzącej przez dany punkt, aby odpowiadający jej wektor naprężenia \bar{p}_v miał taki sam kierunek jak wersor normalny płaszczyzny \bar{v} .



Zauważmy, że utożsamiając kierunek wersora normalnego płaszczyzny z kierunkiem np. "1" osi nowego układu, wektor naprężenia tworzący pierwszy wiersz "nowego" tensora naprężenia miałby niezerową tylko pierwszą składową - składową normalną. Byłaby ona największa spośród wszystkich możliwych. Takie naprężenie **normalne** nosi nazwę naprężenia **głównego**, a odpowiadająca mu płaszczyzna to płaszczyzna **główna**.

- ★ warunek kolinearności $\bar{p}_v = \sigma \bar{v} \Rightarrow p_{vi} = \sigma \alpha_{vi}$
- ★ wektor naprężenia $\bar{p}_v = T_\sigma \bar{v} \Rightarrow p_{vi} = \sigma_{ij} \alpha_{vj}$
- ★ zagadnienie własne $T_\sigma v = \sigma v \Rightarrow \sigma_{ij} \alpha_{vj} = \sigma \alpha_{vi}$

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) \alpha_{vj} = 0 \quad + \quad \alpha_{vj} \alpha_{vj} = 1 \quad (\text{war. jednostkowej dług. wersora})$$

Warunek konieczny istnienia rozwiązania ze wzg. na elementy macierzy przejścia

$$\det |\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma| = 0 \quad \left| \begin{matrix} \sigma_{11} - \sigma & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} - \sigma & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} - \sigma \end{matrix} \right| = 0$$

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (\text{równ. charakterystyczne})$$

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad , \quad I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{13} \\ \sigma_{13} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad , \quad I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$

- ★ równanie charakterystyczne ma zawsze 3 pierwiastki rzeczywiste, które można uporządkować $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
- ★ każdej z wartości głównych odpowiada płaszczyzna główna, określona wersorem normalnym

$$\sigma_1 \Rightarrow \bar{v}_1(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13})$$

$$\sigma_2 \Rightarrow \bar{v}_2(\alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23})$$

$$\sigma_3 \Rightarrow \bar{v}_3(\alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33})$$

★ wersory określające płaszczyzny główne są ortonormalne, tzn.

$$\bar{v}_i \circ \bar{v}_j = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases}$$

$$\bar{v}_1 \times \bar{v}_2 = \bar{v}_3 \quad \bar{v}_2 \times \bar{v}_3 = \bar{v}_1 \quad \bar{v}_3 \times \bar{v}_1 = \bar{v}_2$$

★ dla dowolnego tensora naprężenia zawsze istnieją 3 wzajemnie prostopadłe naprężenia i kierunki (płaszczyzny) główne.

★ procedura określania kierunków głównych, czyli zarazem macierzy przejścia do kierunków głównych

$$(\sigma_{11} - \sigma) \alpha_{11} + \sigma_{12} \alpha_{12} + \sigma_{13} \alpha_{13} = 0$$

np. dla $\sigma = \sigma_1$ $\sigma_{12} \alpha_{11} + (\sigma_{22} - \sigma) \alpha_{12} + \sigma_{23} \alpha_{13} = 0$

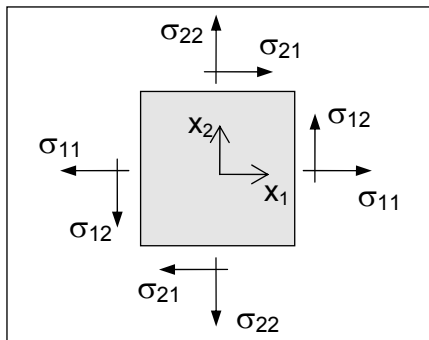
$$\sigma_{13} \alpha_{11} + \sigma_{23} \alpha_{12} + (\sigma_{33} - \sigma) \alpha_{13} = 0$$

$$+ \alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2 + \alpha_{13}^2 = 1 \quad (*)$$

- 1) wziąć którekolwiek 2 spośród 3 równań, kładąc w nich np. $\alpha_{13} = t$
- 2) znaleźć $\alpha_{11} = \alpha_{11}(t)$, $\alpha_{12} = \alpha_{12}(t)$
- 3) wyznaczyć parametr t z warunku " (*) "
- 4) obliczyć wartości α_{11} , α_{12} , α_{13}
- 5) postąpić analogicznie dla σ_2
- 6) wyznaczyć $\bar{v}_3 = \bar{v}_1 \times \bar{v}_2$

7. PŁASKI STAN NAPRĘŻENIA

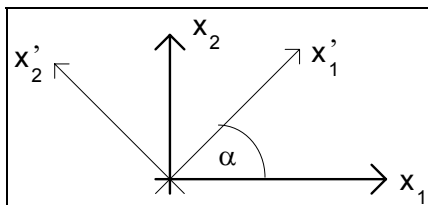
★ stan naprężenia, dla którego wszystkie składowe leżą w jednej płaszczyźnie, np. (x_1, x_2) .



★ tensor naprężenia

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{bmatrix}$$

★ macierz przejścia



$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

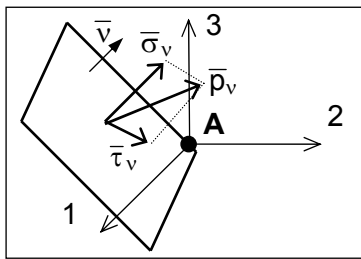
★ naprężenia główne $\sigma'_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{jl} \sigma_{kl}$ + przekształcenia

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2} \quad \text{tg } \alpha_{1,2} = - \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{22} - \sigma_{1,2}}$$

★ pseudopłaski stan naprężenia - jak wyżej, ale $\sigma_{33} \neq 0$. Rezultaty jak dla PSN, a trzecie naprężenie główne $\sigma_3 = \sigma_{33}$

8. EKSTREMALNE NAPRĘŻENIA STYCZNE

Problem : W punkcie A znany jest tensor naprężenia w osiach głównych. Jaką płaszczyzną należy przekroić ciało w pkt. A, aby miara rzutu wektora naprężenia odpowiadającego tej płaszczyźnie na nią samą była maksymalna?



$$\bar{p}_v = (p_{v1}; p_{v2}; p_{v3}) \quad \text{wektor naprężenia}$$

$$\bar{v} = (\alpha_{v1}; \alpha_{v2}; \alpha_{v3}) \quad \text{wersor normalny}$$

σ_v - miara rzutu wektora naprężenia \bar{p}_v na normalną \bar{v}

τ_v - miara rzutu wektora naprężenia \bar{p}_v na płaszczyznę

$$\sigma_v = \bar{p}_v \circ \bar{v} = p_{v1} \alpha_{v1} + p_{v2} \alpha_{v2} + p_{v3} \alpha_{v3}$$

$$p_{vi} = \sigma_{ij} \alpha_{vj} \Rightarrow p_{v1} = \sigma_1 \alpha_{v1} \quad p_{v2} = \sigma_2 \alpha_{v2} \quad p_{v3} = \sigma_3 \alpha_{v3}$$

★ Procedura rozwiązania

$$\sigma_v = \sigma_1 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3 \alpha_{v3}^2 \quad (1)$$

$$|\bar{p}_v|^2 = \sigma_v^2 + \tau_v^2 \Rightarrow \tau_v^2 = |\bar{p}_v|^2 - \sigma_v^2$$

$$\tau_v^2 = \sigma_1^2 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2^2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3^2 \alpha_{v3}^2 - \left(\sigma_1 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3 \alpha_{v3}^2 \right)^2 \quad (2)$$

+ warunek

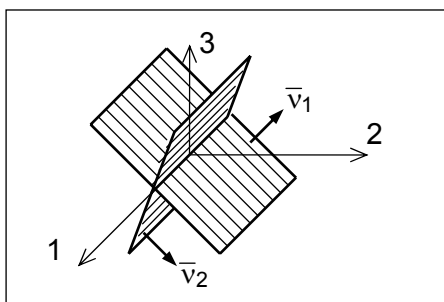
$$\alpha_{v1}^2 + \alpha_{v2}^2 + \alpha_{v3}^2 = 1 \quad (3)$$

Zadanie sprowadza się do znalezienia ekstremum funkcji (2) z warunkiem pobocznym (3)

1) z war. (3) wyeliminować np. α_{v3}^2 i wstawić do funkcji (2)

2) warunki konieczne istnienia ekstremum $\frac{\partial \tau_v^2}{\partial \alpha_{v1}} = 0$; $\frac{\partial \tau_v^2}{\partial \alpha_{v2}} = 0$ + przekształcenia

Rozwiązanie : Naprężenia styczne osiągają swoje ekstrema na płaszczyznach nachylonych pod kątami 45° do płaszczyzn głównych.



$$\bar{v}_1 (0; 0.707; 0.707) \quad ; \quad \bar{v}_2 (0; 0.707; -0.707)$$

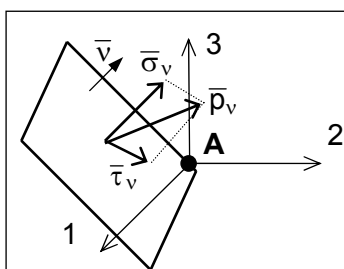
$$\tau_v (0; \pm 0.707; \pm 0.707) = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_v (\pm 0.707; 0; \pm 0.707) = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$\tau_v (\pm 0.707; \pm 0.707; 0) = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

9. KOŁA MOHRA

Problem : W punkcie A znany jest tensor naprężenia w osiach głównych. Określić zbiór rozwiązań (σ_v, τ_v) dla dowolnych płaszczyzn przekroju ciała, przechodzących przez pkt. A.



$$\bar{p}_v = (p_{v1}; p_{v2}; p_{v3}) \quad \text{wektor naprężenia}$$

$$\bar{v} = (\alpha_{v1}; \alpha_{v2}; \alpha_{v3}) \quad \text{wersor normalny}$$

σ_v - miara rzutu wektora \bar{p}_v na \bar{v}

τ_v - miara rzutu wektora \bar{p}_v na płaszczyznę

★ tensor naprężenia $T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ & \sigma_2 & 0 \\ & & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

★ Procedura rozwiązania

$$\sigma_v = \bar{p}_v \circ \bar{v} = p_{v1} \alpha_{v1} + p_{v2} \alpha_{v2} + p_{v3} \alpha_{v3}$$

$$p_{vi} = \sigma_{ij} \alpha_{vj} \Rightarrow p_{v1} = \sigma_1 \alpha_{v1} ; p_{v2} = \sigma_2 \alpha_{v2} ; p_{v3} = \sigma_3 \alpha_{v3}$$

$$\sigma_v = \sigma_1 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3 \alpha_{v3}^2 \quad (1)$$

$$|\bar{p}_v|^2 = \sigma_v^2 + \tau_v^2 \Rightarrow \tau_v^2 = |\bar{p}_v|^2 - \sigma_v^2$$

$$\tau_v^2 = \sigma_1^2 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2^2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3^2 \alpha_{v3}^2 - \left(\sigma_1 \alpha_{v1}^2 + \sigma_2 \alpha_{v2}^2 + \sigma_3 \alpha_{v3}^2 \right)^2 \quad (2)$$

$$+ \text{warunek} \quad \alpha_{v1}^2 + \alpha_{v2}^2 + \alpha_{v3}^2 = 1 \quad (3)$$

Rozwiązanie układu równań (1), (2), (3) wzgl. α_{vi}^2 ma postać :

$$\alpha_{v1}^2 = \frac{\tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_2)(\sigma_v - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \alpha_{v2}^2 = \frac{\tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_3)(\sigma_v - \sigma_1)}{(\sigma_2 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_1)}$$

$$\alpha_{v3}^2 = \frac{\tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_1)(\sigma_v - \sigma_2)}{(\sigma_3 - \sigma_1)(\sigma_3 - \sigma_2)}$$

Z relacji większościowych między naprężeniami głównymi wynikają nierówności:

$$\tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_2)(\sigma_v - \sigma_3) \geq 0 \quad ; \quad \tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_3)(\sigma_v - \sigma_1) \leq 0 \quad ; \quad \tau_v^2 + (\sigma_v - \sigma_1)(\sigma_v - \sigma_2) \geq 0$$

Przekształcenia tych nierówności prowadzą do związków:

$$K_{23} \quad \left(\sigma_v - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau_v^2 \geq \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right)^2$$

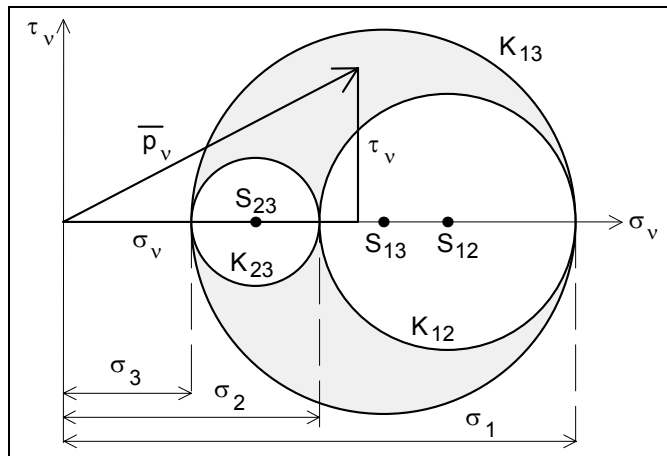
zewnątrz okręgu o promieniu $(\sigma_2 - \sigma_3) / 2$ i środku $[(\sigma_2 + \sigma_3) / 2 ; 0]$

$$K_{13} \quad \left(\sigma_v - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau_v^2 \leq \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2$$

wnętrze okręgu o promieniu $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ i środku $[(\sigma_1 + \sigma_3) / 2 ; 0]$

$$K_{12} \quad \left(\sigma_v - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2 + \tau_v^2 \geq \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right)^2$$

wnętrze okręgu o promieniu $(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$ i środku $[(\sigma_1 + \sigma_2) / 2 ; 0]$

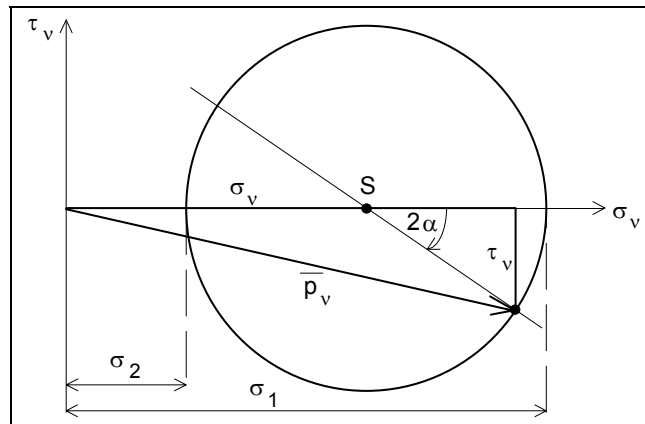


WNIOSEK :

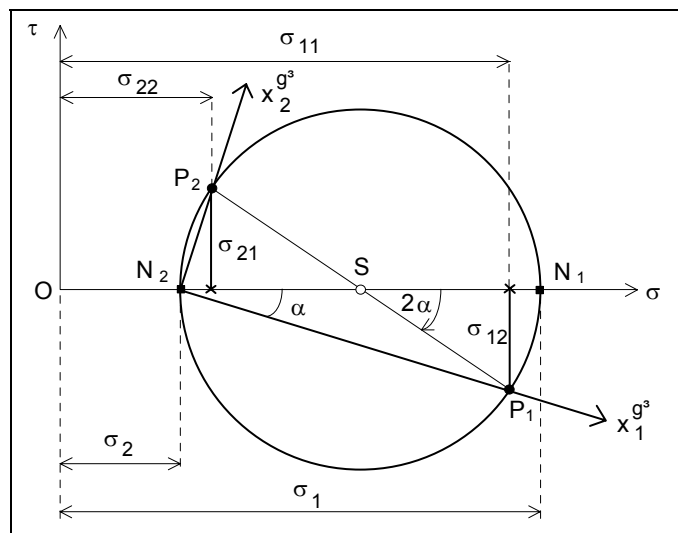
Dla danego tensora naprężenia w pkt. A , określonego w osiach głównych, koniec wektora naprężenia \bar{p}_v odpowiadającego dowolnej płaszczyźnie przechodzącej przez pkt. A musi leżeć w obszarze określonym przez koła Mohra (obszar "zaciemniony"). Jest to obszar, w którym leżą wszystkie pary (σ_v , τ_v)

Zastosowanie kół Mohra dla płaskiego stanu naprężenia ($\sigma_3 = 0$)

- ★ **ZADANIE 1** : Dane są naprężenia główne σ_1 i σ_2 oraz kąt α , pod jakim nachylona jest płaszczyzna do kierunku naprężenia σ_1 . Wyznaczyć naprężenia normalne σ_v i styczne τ_v przynależne tej płaszczyźnie.



- ★ **ZADANIE 2**: Dany jest tensor naprężenia w pkt. A w dowolnym ukł. współrzędnych (x_1, x_2). Znaleźć naprężenia główne σ_1 i σ_2 oraz ich kierunki.



- ★ Kolejność czynności:

- 1) odłożyć na osi "σ" wartości σ_{11} i σ_{22}
- 2) z punktu $\sigma = \sigma_{11}$ odłożyć na osi "τ" wartość σ_{12} - jeżeli $\sigma_{12} > 0$ to po dodatniej stronie osi "τ" (na rysunku przyjęto $\sigma_{12} < 0$). Z punktu $\sigma = \sigma_{22}$ odłożyć wartość σ_{12} po stronie przeciwnej osi "τ" . Otrzymujemy punkty P_1 i P_2
- 3) połączyć punkty P_1 i P_2 - punkt S, przecięcia odc. P_1 - P_2 z osią "σ" jest środkiem koła
- 4) narysować koło o środku w pkt. S i promieniu SP_1 (SP_2). Otrzymujemy punkty N_1 i N_2 , przecięcia się okręgu z osią "σ". Odcinki ON_1 i ON_2 wyznaczają wartości naprężeń głównych σ_1 i σ_2
- 5) połączyć punkt P_1 z N_2 - otrzymujemy oś x_1^{g1} , określającą kierunek główny odpowiadający pierwszemu naprężeniu głównemu
- 6) połączyć punkt P_2 z N_2 - otrzymujemy oś x_2^{g2} , określającą kierunek główny odpowiadający drugiemu naprężeniu głównemu.