



# Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»



Кафедра механічної та біомедичної інженерії

## Індивідуальне завдання з дисципліни «Композиційні матеріали»

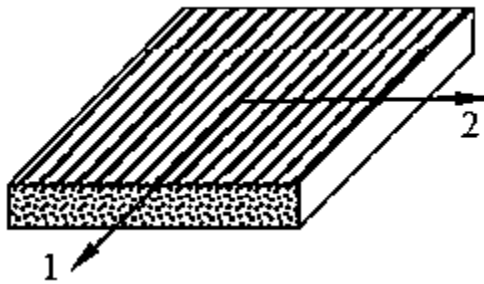
**Варіант XXX**

Виконав:  
ст.гр. XXXX  
YYYYY.

Перевірив: проф. Долгов О.М.

Дніпро 2023

**Тема завдання:** дослідження фізико-механічних властивостей односпрямованих і шаруватого композиційних матеріалів (КМ).



Односпрямований КМ (моно шар)

**Завдання:** для двох різних односпрямованих КМ заданої структури визначити:

1. Фізико-механічні властивості кожного односпрямованого КМ.
2. Залишкові температурні напруження.
3. Питомі характеристики кожного КМ.

**Додаткове завдання:**

За заданими умовами зовнішнього навантаження, визначити міцність двошарового пакету КМ з моношарів, досліджених в основній частині завдання. Волокна шарів взаємно перпендикулярні.

**ВАРІАНТ XXX**

## Початкові данні:

Матеріал волокна (шар 1)	Вуглець
Густина	$\rho_B = 1700 \text{ кг/м}^3$
Модуль пружності	$E_B = 3 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коеф. Пуассона	$\mu_B = 0,22$
КЛТР	$\alpha_B = -3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$
Міцність при розтягу	$\sigma_{Bp} = 3000 \text{ МПа}$
Міцність при стиску	$\sigma_{Bc} = 2500 \text{ МПа}$
Міцність при зсуві	$\tau_B = 1250 \text{ МПа}$

Матеріал волокна (шар 2)	Органіт
Густина	$\rho_B = 1400 \text{ кг/м}^3$
Модуль пружності	$E_B = 12 \cdot 10^4 \text{ МПа}$
Коеф. Пуассона	$\mu_B = 0,32$
КЛТР	$\alpha_B = -2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$
Міцність при розтягу	$\sigma_{Bp} = 2800 \text{ МПа}$
Міцність при стиску	$\sigma_{Bc} = 2000 \text{ МПа}$
Міцність при зсуві	$\tau_B = 1000 \text{ МПа}$

Матриця	Епоксідна
Густина	$\rho_M = 1300 \text{ кг/м}^3$
Модуль пружності	$E_M = 4000 \text{ МПа}$
Коеф. Пуассона	$\mu_M = 0,3$
КЛТР	$\alpha_M = 60 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$
Міцність при розтягу	$\sigma_{Mp} = 60 \text{ МПа}$
Міцність при стиску	$\sigma_{Mc} = 140 \text{ МПа}$
Міцність при зсуві	$\tau_M = 30 \text{ МПа}$

Зміна температури	$\Delta T = -150^\circ\text{К}$
Об'ємний вміст волокон	$\theta = 0,55$
Товщина шарів	$\delta_1 = 4\delta_0 \text{ мм}$ $\delta_2 = 5\delta_0 \text{ мм}$
Діючі напруження	$\sigma_x = -200 \text{ МПа}$ $\sigma_y = -300 \text{ МПа}$

## РОЗРАХУНОК

### Механічні властивості односпрямованих КМ

#### Матриця – епоксидна

#### Модуль пружності односпрямованого КМ вздовж волокон:

$$E_{1i} = E_{Vi} \theta + E_M (1 - \theta);$$

Вуглепластик:

$$E_{1B} = 300000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55) = 166800 \text{ МПа}$$

Органопластик:

$$E_{1o} = 120000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55) = 67800 \text{ МПа}$$

#### Модуль пружності односпрямованого КМ поперек волокон:

$$E_{2i} = \frac{E_B E_M}{E_M \theta + E_{Vi} (1 - \theta)}$$

Вуглепластик:

$$E_{2B} = \frac{300000 \cdot 4000}{4000 \cdot 0,55 + 300000 \cdot (1 - 0,55)} = 8746 \text{ МПа}$$

Органопластик:

$$E_{2o} = \frac{120000 \cdot 4000}{4000 \cdot 0,55 + 120000 \cdot (1 - 0,55)} = 8541 \text{ МПа}$$

#### Модуль зсуву:

$$\text{Волокон: } G_{Vi} = \frac{E_{Vi}}{2(1 + \mu_{Vi})}$$

$$\text{Матриці: } G_M = \frac{E_M}{2(1 + \mu_M)}$$

$$\text{Вуглець: } G_B = \frac{300000}{2 \cdot (1 + 0,22)} = 122951 \text{ МПа}$$

$$\text{Органіт: } G_o = \frac{120000}{2 \cdot (1 + 0,32)} = 45455 \text{ МПа}$$

Матриця:

$$G_M = \frac{4000}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 1538 \text{ МПа}$$

$$\text{Односпрямованого КМ: } G_{12i} = \frac{G_{Vi} G_M}{G_M \theta + G_{Vi} (1 - \theta)}$$

Вуглепластик:

$$G_{12B} = \frac{122951 \cdot 1538}{1538 \cdot 0,55 + 122951 \cdot (1 - 0,55)} = 3367 \text{ МПа}$$

Органопластик:

$$G_{12o} = \frac{45455 \cdot 1538}{1538 \cdot 0,55 + 45455 \cdot (1 - 0,55)} = 3283 \text{ МПа}$$

### **Коефіцієнт Пуассона односпрямованого КМ при навантаженні вздовж осі 1:**

$$\mu_{12i} = \mu_{Bi}\theta + \mu_M(1 - \theta)$$

Вуглепластик:

$$\mu_{12B} = 0,22 \cdot 0,55 + 0,3 \cdot (1 - 0,55) = 0,256$$

Органопластик:

$$\mu_{12O} = 0,32 \cdot 0,55 + 0,3 \cdot (1 - 0,55) = 0,311$$

### **Коефіцієнт Пуассона односпрямованого КМ при навантаженні вздовж осі 2:**

$$\mu_{21i} = \frac{E_{Bi} \cdot E_M \cdot (\mu_{Bi} \cdot \theta + \mu_M(1 - \theta))}{(E_{Bi} \cdot \theta + E_M(1 - \theta))(E_M \theta + E_{Bi}(1 - \theta))}$$

Вуглепластик:

$$\mu_{21B} = \frac{300000 \cdot 4000 \cdot (0,22 \cdot 0,55 + 0,3 \cdot (1 - 0,55))}{(300000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55))(4000 \cdot 0,55 + 300000 \cdot (1 - 0,55))} = 0,013423$$

Органопластик:

$$\mu_{21O} = \frac{120000 \cdot 4000(0,32 \cdot 0,55 + 0,3 \cdot (1 - 0,55))}{(120000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55))(4000 \cdot 0,55 + 120000 \cdot (1 - 0,55))} = 0,039177$$

### **Перевірка виконання пружного потенціалу:**

$$E_{2i}\mu_{12i} = E_{1i}\mu_{21i}$$

Вуглепластик:

$$E_{2B}\mu_{12B} = 8746 \cdot 0,256 = 2239$$

$$E_{1B}\mu_{21B} = 166800 \cdot 0,0134 = 2235$$

Органопластик:

$$E_{2O}\mu_{12O} = 8541 \cdot 0,311 = 2656$$

$$E_{1O}\mu_{21O} = 67800 \cdot 0,03917 = 2656$$

### **Коефіцієнти лінійного температурного розширення (КЛТР)**

#### **КЛТР односпрямованого КМ уздовж волокон:**

$$\alpha_{1i} = \frac{\alpha_{Bi}E_{Bi}\theta + \alpha_M E_M(1 - \theta)}{E_{Bi}\theta + E_M(1 - \theta)}$$

Вуглепластик:

$$\alpha_{1B} = \frac{-3 \cdot 300000 \cdot 0,55 + 60 \cdot 4000 \cdot (1 - 0,55)}{300000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)} = -2,320 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Органопластик:

$$\alpha_{1O} = \frac{-2 \cdot 120000 \cdot 0,55 + 60 \cdot 4000 \cdot (1 - 0,55)}{120000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)} = -0,354 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

#### **КЛТР односпрямованого КМ поперек волокон:**

$$\alpha_{2i} = \alpha_{Bi}\theta + \alpha_M(1 - \theta)$$

Вуглепластик:

$$\alpha_{2B} = (-3 \cdot 0,55 + 60 \cdot (1 - 0,55)) \cdot 10^{-6} = 25,35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Органопластик:

$$\alpha_{20} = (-2 \cdot 0,55 + 60 \cdot (1 - 0,55)) \cdot 10^{-6} = 25,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

**Міцність односпрямованого КМ на розтягування вздовж волокон:**

$$F_{1ip} = \frac{\sigma_{вр}}{E_B} (E_B \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мр}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{вр}}{E_B}$$
$$F_{1ip} = \frac{\sigma_{мр}}{E_M} (E_B \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мр}}{E_M} \leq \frac{\sigma_{вр}}{E_B}$$

$$\frac{\sigma_{мр}}{E_M} = \frac{60}{4000} = 0,015$$
$$\frac{\sigma_{вр}}{E_B} = \frac{3000}{300000} = 0,01$$
$$\frac{\sigma_{ор}}{E_o} = \frac{2800}{120000} = 0,023$$

Для вуглепластика:

$$F_{1вр} = \frac{\sigma_{вр}}{E_B} (E_B \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мр}}{E_M} = 0,015 \geq \frac{\sigma_{вр}}{E_B} = 0,01$$
$$F_{1вр} = 0,01 \cdot (300000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)) = 1668 \text{ МПа}$$

Для органопластика:

$$F_{1ор} = \frac{\sigma_{мр}}{E_M} (E_o \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мр}}{E_M} = 0,015 \leq \frac{\sigma_{ор}}{E_o} = 0,023$$
$$F_{1ор} = 0,015 \cdot (120000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)) = 1017 \text{ МПа}$$

**Міцність односпрямованого КМ на стиснення уздовж волокон:**

$$F_{1іст} = \frac{\sigma_{мст}}{E_M} (E_B \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мст}}{E_M} < \frac{\sigma_{вст}}{E_B}$$
$$F_{1іс} = \frac{\sigma_{вст}}{E_B} (E_o \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мст}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{вст}}{E_B}$$

$$\frac{\sigma_{мст}}{E_M} = \frac{140}{4000} = 0,035$$
$$\frac{\sigma_{вст}}{E_B} = \frac{2500}{300000} = 0,008$$
$$\frac{\sigma_{ост}}{E_o} = \frac{2000}{120000} = 0,016$$

Для вуглепластика:

$$F_{1вст} = \frac{\sigma_{вст}}{E_B} (E_B \theta + E_M (1 - \theta)), \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{мст}}{E_M} = 0,035 > \frac{\sigma_{вст}}{E_B} = 0,008$$
$$F_{1вст} = 0,008 \cdot (300000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)) = 1334 \text{ МПа}$$

Для органопластика:

$$F_{1\text{ост}} = \frac{\sigma_{\text{ост}}}{E_0} (E_0 \theta + E_M (1 - \theta)), \text{якщо } \frac{\sigma_{\text{мст}}}{E_M} = 0,035 \geq \frac{\sigma_{\text{ост}}}{E_0} = 0,016$$

$$F_{1\text{ост}} = 0,016 \cdot (120000 \cdot 0,55 + 4000 \cdot (1 - 0,55)) = 1085 \text{ МПа}$$

**Міцність односпрямованого КМ на розтягування поперек волокон:**

$$F_{2ip} = \sigma_{MP} E_{2i} \left( \frac{2\theta}{0,45\pi} \left( \frac{1}{E_{Bi}} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right)$$

Вуглепластик:

$$F_{2вп} = 60 \cdot 8746 \cdot \left( \frac{2 \cdot 0,55}{0,45 \cdot 3,14} \cdot \left( \frac{1}{300000} - \frac{1}{4000} \right) + \frac{1}{4000} \right) = 30,4 \text{ МПа}$$

Органопластик:

$$F_{2оп} = 60 \cdot 8541 \cdot \left( \frac{2 \cdot 0,55}{0,45 \cdot 3,14} \cdot \left( \frac{1}{120000} - \frac{1}{4000} \right) + \frac{1}{4000} \right) = 31,7 \text{ МПа}$$

**Міцність односпрямованого КМ на стиснення поперек волокон:**

$$F_{2i\text{ст}} = F_{2ip} \frac{\sigma_{MC}}{\sigma_{MP}}$$

$$\text{Вуглепластик: } F_{2вст} = 30,4 \cdot \frac{140}{60} = 70,99 \text{ МПа}$$

$$\text{Органопластик: } F_{2ост} = 31,7 \cdot \frac{140}{60} = 73,98 \text{ МПа}$$

**Міцність односпрямованого КМ на зсув:**

$$F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} G_{12B}, \quad \text{якщо } \frac{\tau_M}{G_M} \geq \frac{\tau_B}{G_B} 0,01$$

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M} G_{12M}, \quad \text{якщо } \frac{\tau_M}{G_M} \leq \frac{\tau_B}{G_B}$$

$$\frac{\tau_M}{G_M} = \frac{30}{1538} = 0,02$$

$$\frac{\tau_B}{G_B} = \frac{1250}{122951} = 0,01$$

$$\frac{\tau_0}{G_0} = \frac{1000}{45455} = 0,022$$

$$\text{Вуглепластик: } F_{12B} = \frac{\tau_B}{G_B} G_{12B}, \quad \text{якщо } \frac{\tau_M}{G_M} = 0,02 \geq \frac{\tau_B}{G_B} 0,01$$

$$F_{12B} = 0,01 \cdot 3367 = 33,67 \text{ МПа}$$

$$\text{Органопластик: } F_{12O} = \frac{\tau_M}{G_M} G_{12O}, \quad \text{якщо } \frac{\tau_M}{G_M} = 0,02 \leq \frac{\tau_0}{G_0} = 0,022$$

$$F_{120} = 0,02 \cdot 3283 = 65,66 \text{ МПа}$$

## Визначення залишкових напружень в компонентах односпрямованого КМ

### Температурні напруження у волокнах

$$\sigma_{1B}^T = E_{Bi} E_M \Delta T (1 - \theta) \frac{\alpha_M - \alpha_{Bi}}{E_{Bi} \theta - E_M (1 - \theta)}$$

$$\Delta T = -150^\circ \text{ К}$$

У вуглепластику:

$$\sigma_{1B}^T = 300000 \cdot 4000 \cdot (-150)(1 - 0,55) \frac{(60 + 3) \cdot 10^{-6}}{300000 \cdot 0,55 - 4000(1 - 0,55)} = -31,268 \text{ МПа}$$

$$-31,268 \text{ МПа} < \sigma_{BC}$$

В органопластику:

$$\sigma_{10}^T = 120000 \cdot 4000 \cdot (-150)(1 - 0,55) \frac{(60 + 2) \cdot 10^{-6}}{120000 \cdot 0,55 - 4000(1 - 0,55)} = -31,290 \text{ МПа}$$

$$-31,290 \text{ МПа} < \sigma_{BC}$$

### Температурні напруження в матриці:

$$\sigma_{1M}^T = E_{Bi} E_M \Delta T \theta \frac{\alpha_B - \alpha_M}{E_{Bi} \theta + E_M (1 - \theta)}$$

У вуглепластику:

$$\sigma_{1MB}^T = \frac{300000 \cdot 4000(-150)(-3 - 60) \cdot 10^{-6}}{166800} = 37,392 \text{ МПа} < \sigma_{MP}$$

В органопластику:

$$\sigma_{1MB}^T = \frac{120000 \cdot 4000 \cdot (-150)(-2 - 60)}{67800} = 36,213 \text{ МПа} < \sigma_{MP}$$

$$\sigma_{MP} = 60 \text{ МПа}$$

**Висновок:** КМ із заданими параметрами можуть існувати.

## Визначення питомих характеристик односпрямованих КМ

1) Густина КМ:  $\rho = \rho_{Bi} \theta + \rho_M (1 - \theta)$

Вуглепластик:  $\rho_B = 1700 \cdot 0,55 + 1300 \cdot (1 - 0,55) = 1520 \text{ кг/м}^3$

Органопластик:  $\rho_o = 100 \cdot 0,55 + 1300 \cdot (1 - 0,55) = 1355 \text{ кг/м}^3$



## 2) Питома жорсткість і міцність КМ:

### а) Вуглепластик:

питома жорсткість уздовж волокон:

$$\frac{E_{1В}}{\rho_B} = \frac{166800}{1520} = 110 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома жорсткість поперек волокон:

$$\frac{E_{2В}}{\rho_B} = \frac{8746}{1520} = 5,75 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на розтяг уздовж волокон:

$$\frac{F_{1Вр}}{\rho_B} = \frac{1668}{1520} = 1,1 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на розтяг поперек волокон:

$$\frac{F_{2Вр}}{\rho_B} = \frac{30,423}{1520} = 0,02 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на стискання уздовж волокон:

$$\frac{F_{1Вст}}{\rho_B} = \frac{1334}{1520} = 0,88 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на стискання поперек волокон:

$$\frac{F_{2Вст}}{\rho_B} = \frac{71}{1520} = 0,047 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на зсув:

$$F_{12В} = \frac{\tau_B}{G_B} G_{12В} = \frac{34}{1520} = 0,022 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} \text{М}$$

### б) Органопластик:

питома жорсткість уздовж волокон:

$$\frac{E_{1о}}{\rho_o} = \frac{67800}{1355} = 50 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома жорсткість поперек волокон:

$$\frac{E_{2о}}{\rho_o} = \frac{8541}{1355} = 6,30 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на розтяг уздовж волокон:

$$\frac{F_{1ор}}{\rho_o} = \frac{1017}{1355} = 0,75 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на розтяг поперек волокон:

$$\frac{F_{2ор}}{\rho_o} = \frac{32}{1355} = 0,024 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на стискання уздовж волокон:

$$\frac{F_{1ост}}{\rho_o} = \frac{1085}{1355} = 0,80 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на стискання поперек волокон:

$$\frac{F_{2\text{ост}}}{\rho_0} = \frac{74}{1355} = 0,055 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

питома міцність на зсув:

$$F_{120} = \frac{\tau_0}{G_0} G_{120} = \frac{66}{1355} = 0,049 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

Для порівняння визначимо питому жорсткість і питому міцність конструкційної сталі 45:

$E = 2 \cdot 10^5$ ;  $\sigma_T = 360 \text{ МПа}$ ; густина  $7800 \text{ кг/м}^3$

$$\frac{E}{\rho} = \frac{200000}{7800} = 25,6 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}; \quad \frac{\sigma_T}{\rho} = \frac{360}{7800} = 0,046 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}$$

### Розраховані характеристики КМ

КМ	Вуглепластик	Органопластик
Густина $\text{кг/м}^3$	1520	1355
$E_1$ МПа	166800	67800
$E_2$ МПа	8746	8541
$G_{12}$ МПа	3367	32823
$\mu_{12}$	0,256	0,311
$\mu_{21}$	0,013	0,039
$\alpha_1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	-2,320	-0,354
$\alpha_2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	25,35	25,90
$F_{1p}$ МПа	1668	1017
$F_{1\text{ст}}$ МПа	1334	1085
$F_{2p}$ МПа	30,4	31,7
$F_{2\text{ст}}$ МПа	71	74
$F_{12}$ МПа	34	66

На підставі розрахунків формуємо двошаровий пакет КМ з розглянутих односпрямованих шарів з розташуванням волокон під кутом  $90^\circ$ .

**Вихідні дані:** товщина вуглепластику  $4\delta_0$ ; товщина органопластику  $5\delta_0$ . Зовнішнє навантаження викликає напруження  $\sigma_x = -200 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_y = -300 \text{ МПа}$

Щоб раціонально розташувати шари по відношенню до заданого навантаження ( $\sigma_x$   $\sigma_y$ ), проводимо орієнтовний розрахунок міцності пакету КМ по двох варіантах. Розрахункові формули можна отримати, враховуючи тільки міцність КМ за напрямом армування:

$$F_x^* = \frac{1}{\delta_\Sigma} \sum_{i=1}^2 \delta_i F_{1i} \cos^2 \varphi_i \quad F_{1i} = F_{1pi}, \text{ якщо } \sigma_x > 0$$

$$F_y^* = \frac{1}{\delta_\Sigma} \sum_{i=1}^2 \delta_i F_{1i} \sin^2 \varphi_i \quad F_{1i} = F_{1ci}, \text{ якщо } \sigma_y < 0$$

Варіант I: у вуглепластику волокна вздовж осі x,  
в органопластику – перпендикулярно осі x:

$$F_{x1}^* = \frac{1}{9\delta_0} (1334 \cdot 4\delta_0 \cdot \cos^2 0^\circ + 1085 \cdot 5\delta_0 \cdot \cos^2 90^\circ) = 593 \text{ МПа} > 200 \text{ МПа}$$

$$F_{y1}^* = \frac{1}{9\delta_0} (1334 \cdot 4\delta_0 \cdot \sin^2 0^\circ + 1085 \cdot 5\delta_0 \cdot \sin^2 90^\circ) = 603 \text{ МПа} > 300 \text{ МПа}$$

Варіант II: у вуглепластику волокна перпендикулярно осі x,  
в органопластику – вздовж осі x:

$$F_{x2}^* = \frac{1}{9\delta_0} (1085 \cdot 5\delta_0 \cdot \cos^2 0^\circ + 1334 \cdot 4\delta_0 \cdot \cos^2 90^\circ) = 603 \text{ МПа} > 200 \text{ МПа}$$

$$F_{y2}^* = \frac{1}{9\delta_0} (1085 \cdot 5\delta_0 \cdot \sin^2 0^\circ + 1334 \cdot 4\delta_0 \cdot \sin^2 90^\circ) = 593 \text{ МПа} > 300 \text{ МПа}$$

Запас міцності за 1-м варіантом складає:

$$n_{x1} = \frac{F_{x1}^*}{\sigma_x} = \frac{593}{200} = 2,97; \quad n_{y1} = \frac{F_{y1}^*}{\sigma_y} = \frac{603}{300} = 2,01.$$

Запас міцності за 2-м варіантом складає:

$$n_{x2} = \frac{603}{200} = 3,02; \quad n_{y2} = \frac{593}{300} = 1,97.$$

З розрахунку випливає, що обидва варіанти практично однакові.