

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури

**ЖУРНАЛ**  
лабораторних робіт  
з курсу залізобетонних конструкцій  
для студентів усіх спеціальностей та форм навчання

Роботу виконав студент \_\_\_\_\_

Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ група \_\_\_\_\_

Роботу прийняв \_\_\_\_\_

Київ 2014

УДК 624.012.4:624.92

ББК 38.5

Ж65

Укладачі: О.Д. Журавський, канд. техн. наук, доцент;

Л.В. Афанасьєва, канд. техн. наук, доцент;

Я.О. Бова, канд. техн. наук, асистент

Рецензенти: В.Д. Кріпак, канд. техн. наук, доцент

*Затверджено на засіданні кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій, протокол № 16 від 19 травня 2014 року.*

Видається в авторській редакції.

**Журнал** лабораторних робіт з курсу залізобетонних  
Ж65 конструкцій / уклад. Л.В. Афанасьєва, О.Д. Журавський,  
Я.О. Бова. – К.: КНУБА, 2014. – 36 с.

Містить алгоритми теоретичного розрахунку дослідних зразків, результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць і графіків, порівняння наслідків випробувань, розрахунки та висновки.

Призначено для студентів усіх спеціальностей та форм навчання.

© КНУБА, 2014

# Лабораторна робота № 1

## Експериментально-теоретичні основи деформування залізобетонних конструкцій

**Метою роботи** є ознайомлення з характером деформування, тріщиноутворення і руйнування залізобетонних елементів, а також з діаграмами деформування бетону та арматури під час осьового навантаження і стадіями напружено-деформованого стану залізобетонного елемента під час згинання.

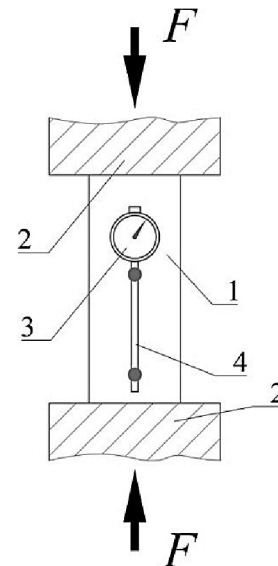
### 1. Міцнісні та деформативні характеристики бетону

Побудову діаграми деформування бетону на стиск виконують на підставі випробування бетонних зразків-призм та циліндрів.

Схема випробувань дослідних бетонних зразків наведена на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Схема випробування дослідних бетонних зразків на стиск:

- 1- дослідний зразок;
- 2- опорні плити випробувальної машини;
- 3- індикатор годинникового типу (ціна поділки 0,001мм);
- 4- утримувач



Загальний характер деформування бетону може бути наведений на рис. 1.2.

$\sigma_c$									
									$\epsilon_c$

Рис. 1.2. Загальний вигляд діаграми " $\sigma_c - \epsilon_c$ " деформування бетону при осьовому стиску: 1 – нормативна діаграма деформування бетону; 2 – розрахункова діаграма деформування бетону

У результаті дослідних випробувань бетонних зразків на стиск отримують характеристики міцності та деформативності бетону:

" $f_{cm}$ " – середня міцність бетону на стиск;

" $f_{ck}$ " – характеристичне значення міцності бетону на стиск у віці 28 діб (нормативний опір бетону на стиск);

" $f_{cd}$ " – розрахункове значення міцності бетону на стиск:

$$f_{cd} = \alpha_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (1.1)$$

де  $\alpha_c$  – коефіцієнт, що враховує вплив виду та тривалості навантаження,

$\alpha_c = 1,0$ ;  $\gamma_c$  – коефіцієнт надійності бетону,  $\gamma_c = 1,3$ ;

" $\varepsilon_{cu}$ " – відносні граничні деформації стиску бетону;

" $\varepsilon_{cl}$ " – відносні деформації стиску бетону при максимальних напруженнях;

" $\varepsilon_{cul}$ " – відносні граничні деформації бетону при осьовому стиску.

Значення напружень стиску в бетоні  $\sigma_c$  визначають за формулами:

– для нормативної діаграми деформування бетону:

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}, \quad \sigma_c = \alpha \cdot f_{ck} \left( 1 - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right); \quad (1.2)$$

$$\text{при } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}, \quad \sigma_c = \alpha \cdot f_{ck};$$

– для розрахункової діаграми деформування бетону:

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad \sigma_c = \alpha \cdot f_{cd} \left( 1 - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right); \quad (1.3)$$

$$\text{при } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad \sigma_c = \alpha \cdot f_{cd};$$

Діаграма деформування бетону на стиск наведена на рис. 1.3.

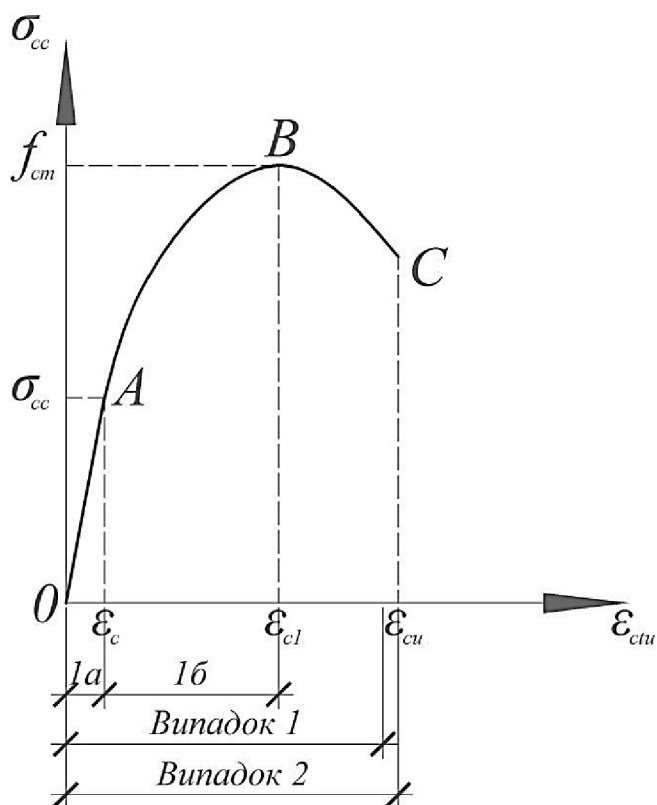


Рис. 1.3. Діаграма деформування бетону на стиск:  
1а, 1б – дві можливі особливості роботи елемента в період стадії I відповідно на ділянках діаграми “0А” і “АВ”; випадки 1, 2 – два можливих випадки руйнування елемента

## 2. Міцнісні та деформативні характеристики арматури

Для побудови діаграми деформування м'яких арматурних сталей виконують випробування зразків арматури на розтяг відповідно до вимог нормативних документів.

Схема випробувань зразків арматури наведена на рис. 1.4.

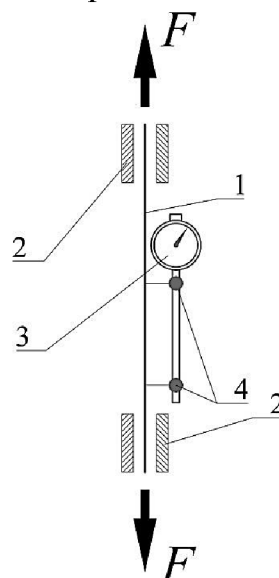


Рис. 1.4. Схема випробування арматурних зразків на розтяг:

- 1 – дослідний зразок;
- 2 – захвати дослідного преса;
- 3 – індикатор годинникового типу (ціна поділки 0,001 мм);
- 4 – утримувач

Загальний характер деформування арматури наведений на рис. 1.5.

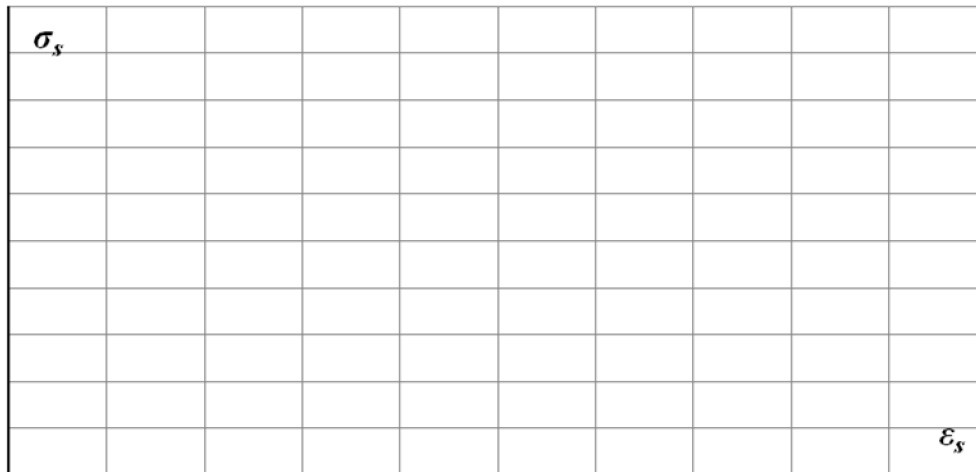


Рис. 1.5. Загальний вигляд діаграми " $\sigma_s - \epsilon_s$ " деформування сталі при осьовому розтягу: 1 – нормативна діаграма деформування сталі; 2 – розрахункова діаграма деформування сталі

В результаті дослідних випробувань арматурних зразків на розтяг отримують характеристики міцності і деформативності арматури:

" $f_c$ " – тимчасовий опір (міцність при розтягу);

" $f_{yk}$ " – характеристичне значення міцності арматури на межі текучості (нормативна міцність при розтягу);

" $f_{yd}$ " – розрахункове значення міцності арматури на межі текучості;

" $\epsilon_{sy}$ " – відносні деформації арматури, що відповідають межі текучості;

" $\epsilon_{uk}$ " – максимальне відносне видовження;

" $\epsilon_{ud}$ " – відносні деформації, що відповідають розрахунковому значення міцності  $f_{yd}$ .

Значення напружень розтягу в арматурі  $\sigma_s$  мають вигляд:

$$\text{при } 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}, \quad \sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s;$$

$$\text{при } \epsilon_s > \epsilon_{sy}, \quad \sigma_s = \sigma_s \cdot f_{yk} = f_{yd};$$

Діаграма деформування арматури на розтяг наведена на рис. 1.6.

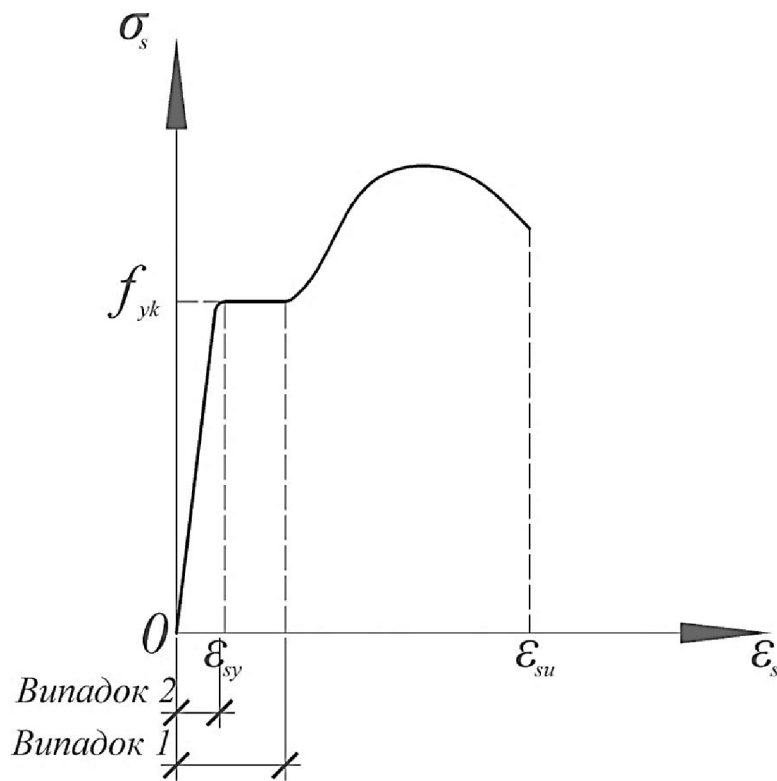


Рис.1.6. Діаграма деформування арматурної сталі на розтяг;  
випадок 1, 2 – два можливі випадки руйнування елемента

### 3. Стадії напружено-деформованого стану

За умови збільшення згинального моменту  $M$  від зовнішнього навантаження від початкового значення до руйнівного в нормальному перерізі залізобетонного елемента змінюється напружено-деформований стан, який умовно відповідає трьом стадіям:

- *Стадія I* – характеризує напружено-деформований стан залізобетонного елемента, що працює без тріщин в розтягнутій зоні (рис. 1.7).

Залежно від величини відносних деформацій найбільш розтягнутих волокон перерізу розрізняють дві можливі особливості роботи елемента в період стадії I (рис. 1.7, а, б).

За наявності незначних величин зовнішнього навантаження деформації стиснутого бетону носять пружний лінійний характер (див. рис. 1.3, ділянка “0A”). Характер епюри напружень в стиснутій та розтягнутій зонах – відповідає трикутнику (рис. 1.7, а).

Під час збільшення навантаження відбувається приріст відносних деформацій в стиснутій і розтягнутій зонах. Стиснутий бетон до утворення

тріщин працює практично пружно й епюра розподілу напружень – трикутна (див. рис. 1.7, б).

Кінець стадії I характеризується тим, що відносні деформації розтягнутого бетону  $\varepsilon_{ct}$  досягають граничних значень  $\varepsilon_{ctu}$ , внаслідок чого виникають перші тріщини.

Стадію I використовують при розрахунках залізобетонних елементів за утворенням тріщин, нормальних до повздовжньої осі елементу, а також при визначенні прогинів згинальних елементів.

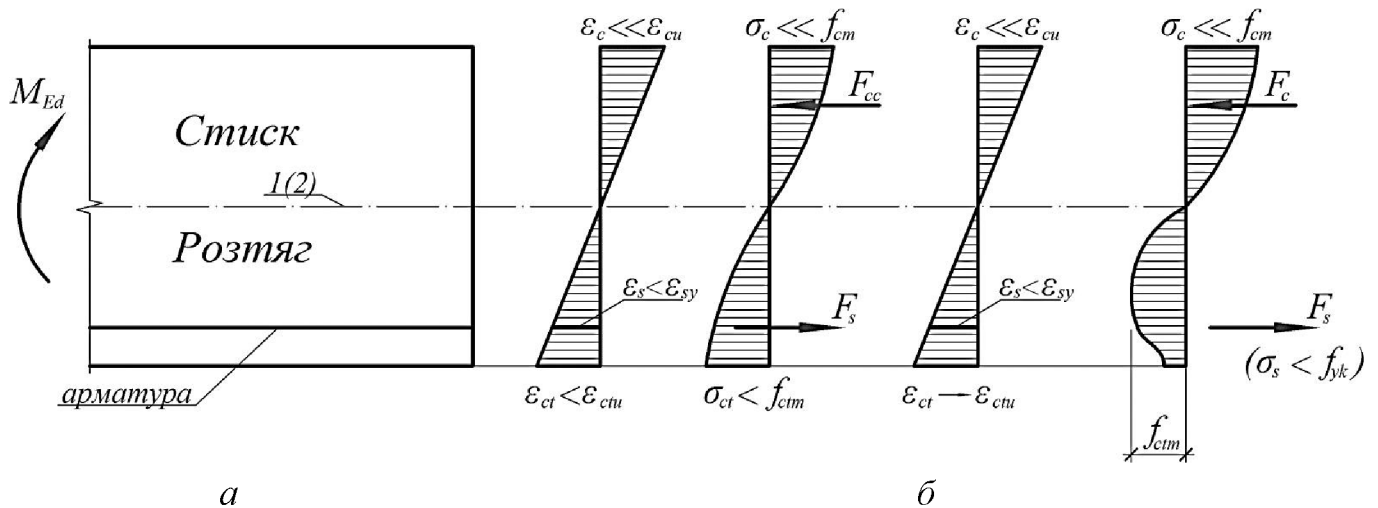


Рис. 1.7. Стадія I:

1 – вісь центра тяжіння перерізу; 2 – нейтральна вісь

– Стадія II – характеризує роботу елемента з тріщинами в розтягнутій зоні (рис. 1.8).

Особливість даної стадії – поява тріщин і виключення з роботи розтягнутого бетону. В перерізі з тріщиною розтягуючі зусилля сприймаються лише арматурою. На ділянках між тріщинами розтягуючі зусилля сприймаються частково арматурою, а частково бетоном. Деформації в розтягнутій арматурі  $\varepsilon_s$  і стиснутому бетоні  $\varepsilon_c$  не досягають граничних значень. Збільшення навантаження викликає викривлення епюри напружень в стиснутому бетоні внаслідок накопичення пластичних деформацій.

Стадія II покладена в основу розрахунку залізобетонних елементів за розкриттям тріщин.

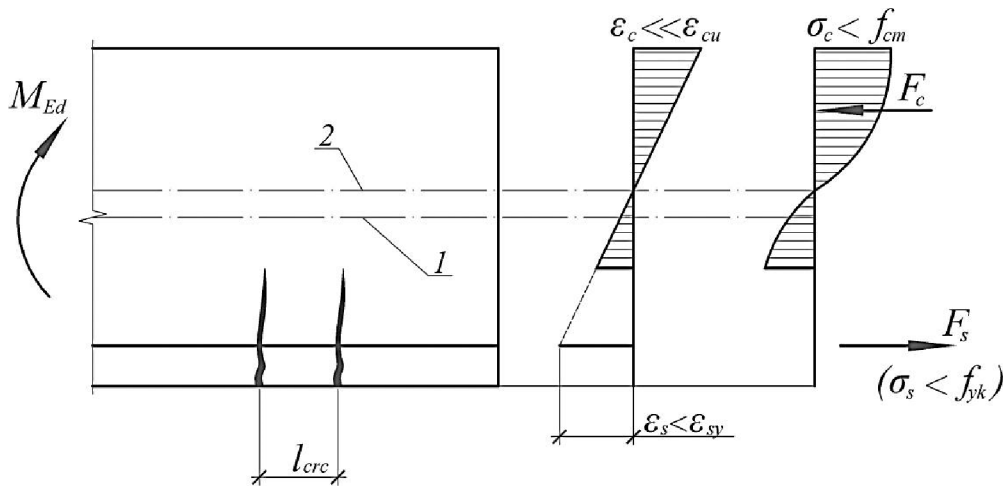


Рис. 1.8. Стадія II:  
1 – вісь центра тяжіння перерізу; 2 – нейтральна вісь

- *Стадія III* – відповідає руйнуванню залізобетонних елементів за нормальним перерізом.

Розрізняють два випадки руйнування:

*1-ий випадок* (рис. 1.9) – відповідає руйнуванню внаслідок досягнення відносних деформацій розтягнутої арматури  $\epsilon_s$  значення  $\epsilon_{sy}$ , що відповідає напруженням на межі текучості (див. рис.1.6). При цьому відносні деформації стиснутого бетону не досягають граничних значень  $\epsilon_{cu}$ . Руйнування відбувається по розтягнутій арматурі внаслідок досягнення деформацій значень  $\epsilon_{su} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_u$ , а також внаслідок досягнення стиснутих деформацій бетону значень  $\epsilon_{cu}$  (рис. 1.3).

*2-ий випадок* (рис. 1.10) відповідає руйнуванню, коли відносні деформації стиснутого бетону досягають граничних  $\epsilon_{cu}$  раніше, ніж в розтягнутій арматурі деформації  $\epsilon_s$  досягнуть межі текучості  $\epsilon_{su}$  (див. рис. 1.6). В цьому випадку виникає роздрібнення бетону в стиснутій зоні і носить небажаний крихкий (миттєвий) характер, що не відповідає безпечним умовам експлуатації конструкцій.

Стадія III покладена в основу розрахунку залізобетонних елементів за міцністю нормальних перерізів.

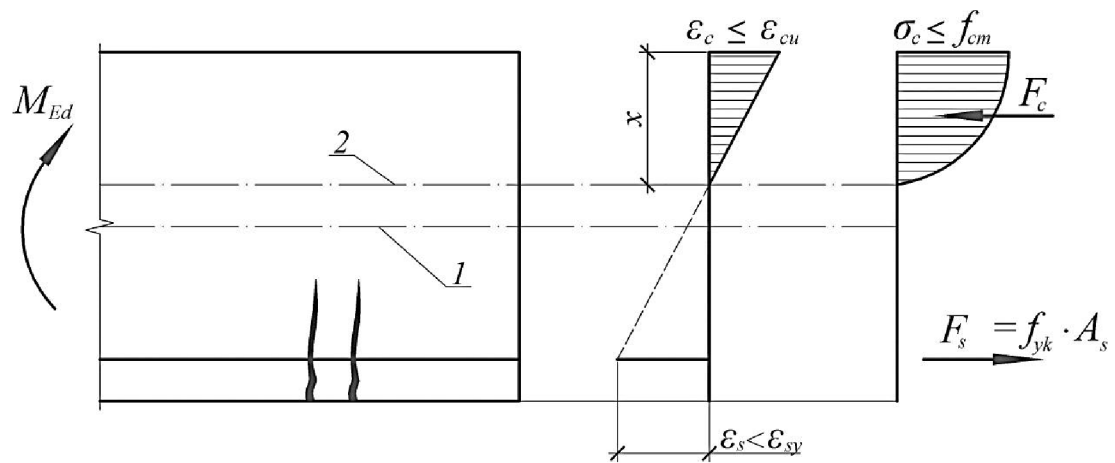


Рис. 1.9. Стадія III 1-й випадок руйнування:  
1 – вісь центра тяжіння перерізу; 2 – нейтральна вісь

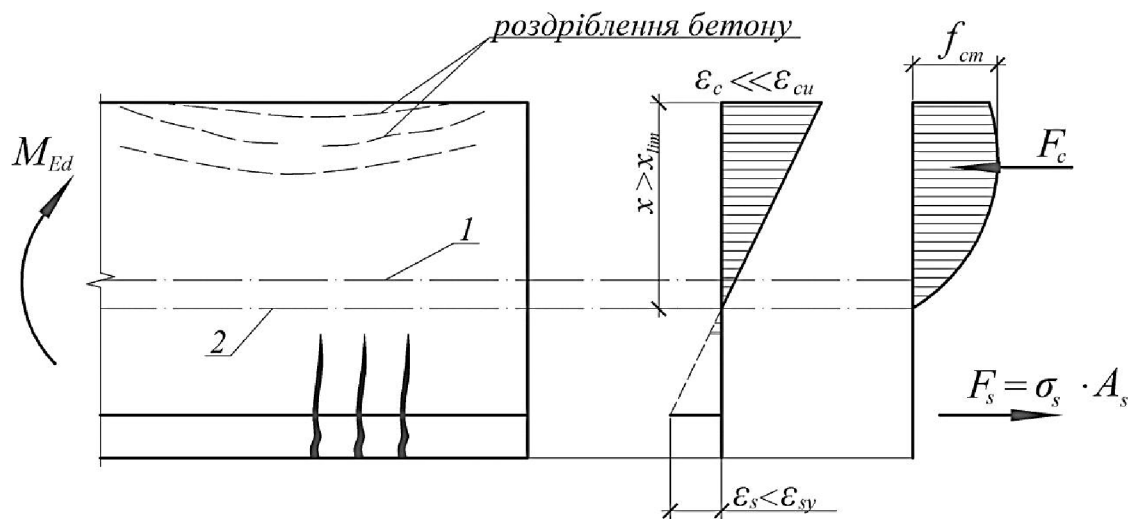


Рис. 1.10. Стадія III 2-й випадок руйнування:  
1 – вісь центра тяжіння перерізу; 2 – нейтральна вісь

**Лабораторна робота № 2**  
**Випробування залізобетонної балки на згин**  
**при руйнуванні за нормальним перерізом**

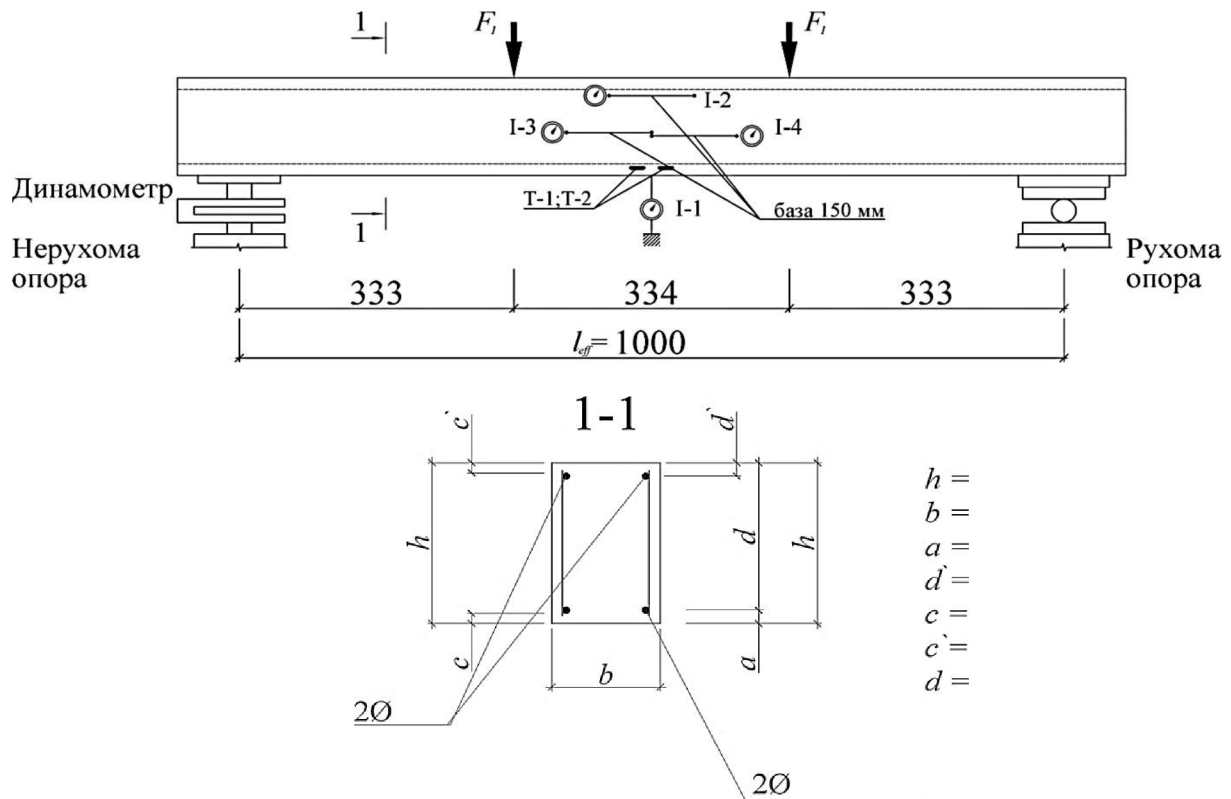


Рис. 1.1

### 1. Протокол випробування

Випробування балки проведено “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Наслідки випробування кубів з ребром 100 мм приведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1

№	Руйнівне зусилля $P$ , Н	Площа перерізу $A$ , мм <sup>2</sup>	Кубикова міцність $f_{cm} = P/A$ , МПа
1		1000	
2		1000	
3		1000	

Середнє значення кубкової міцності бетону:

$$f_{cm} = k \sum_{i=1}^{n=3} f_i / n = k(f_{cm,1} + f_{cm,2} + f_{cm,3}) / n = \quad ,$$

де  $k = 0,91$  – коефіцієнт переходу міцності кубів з ребром 100 мм до стандартних кубів з ребром 100 мм;  $n$  – кількість кубів.

Призмova міцність бетону:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64(S_{f_{cm}}) =$  ,

де  $S_{f_{cm}}$  – середнє квадратичне відхилення:

$$S_{f_{cm}} = \sqrt{D(f_{cm})} =$$

$D(f_{cm})$  — дисперсія, що визначається розсіюванням випадкової величини відносно математичного очікування:

$$D(f_{cm}) = \frac{(f_1 - f_m)^2 n_1 + (f_2 - f_m)^2 n_2 + \dots + (f_n - f_m)^2 n_n}{n_1 + n_2 + \dots + n_n} =$$

Міцність бетону на розтяг:  $f_{ctm} = 0,21 f_{ck}^{2/3} =$

Початковий модуль пружності бетону:

$$E_{cm} = \frac{55000 f_{cm}}{27 + f_{cm}} k_1 = \quad k = 0,9 .$$

Армування балки:

Поздовжня розтягнута арматура:

2Ø\_\_\_ A240:  $A_s =$  мм<sup>2</sup>;  $f_{yd} =$  МПа;  $E_s = 210000$  МПа;

Поздовжня стиснута арматура:

2 Ø\_\_\_ B500:  $A_s' =$  мм<sup>2</sup>;  $f_{yd} =$  МПа;  $E_s = 210000$  МПа;

Розміри балки та її армування наведені на рис. 1.1.

## 2. Розрахунок дослідної балки

$$x = \frac{f_{yd} A_s - f_{yd} A_s'}{b f_{ck}} =$$

$$M_{Rd} = f_{ck} b x (d - 0,5x) + f_{yd} A_s' (d - d') =$$

$$F_{ult,1} = \frac{3M_{Rd}}{l_{eff}} = ,$$

де  $l_{eff}$  – розрахунковий проліт балки, м (див. рис. 2.1).

### 2.1. Розрахунок на утворення тріщин

$$\alpha_e = \frac{E_{sm}}{E_{cm}} = \quad (\text{для арматури } A_s)$$

$$\alpha_e' = \frac{E_{sm}}{E_{cm}} = \quad (\text{для арматури } A_s')$$

$$A_{red} = bh + \alpha_e A_s + \alpha'_e A'_s =$$

$$S_{red} = 0,5bh^2 + \alpha_e A_s + \alpha'_e A'_s (h - d') =$$

$$y = S_{red} / A_{red} =$$

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh(0,5h - y)^2 + \alpha_e A_s (y - a)^2 + \alpha'_e A'_s (h - y - d')^2 =$$

$$W_{red} = I_{red} / y =$$

$$W_{pl} = \gamma W_{red} = \quad \gamma = 1,75 \text{ – для прямокутних перерізів.}$$

$$M_{w,ult} = f_{ctk} W_{pl} =$$

$$F_{w,ult} = 3M_{w,ult} / l_{eff} =$$

## 2.2. Розрахунок на утворення тріщин

Ширину розкриття нормальних тріщин визначаємо для кожної ступені завантаження  $F_1 = 3 \dots 8$  кН.

$$M_1 = \frac{F_1 l_{eff}}{3} = \quad z = 0,8d =$$

$$A_c = b \cdot h = \quad u = 2(b + h) = \quad h_0 = \frac{2A_c}{u} =$$

$$RH = 50\% \quad t_0 = 200 \quad \varphi(\infty; t_0) = 2,8,$$

де  $RH$  – значення вологості лабораторії;  $t_0$  – значення часу, при якому визначається коефіцієнт повзучості бетону.

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty; t)} = \quad \alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} =$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{bd} =$$

Оскільки робоча арматура знаходиться в розтягнутій зоні (стиснуту не враховуємо), висота стиснутої зони дорівнює:

$$x_{II} = d \cdot \sqrt{(\alpha_e \rho_l)^2 + 2\alpha_e \rho_l} - \alpha_e \rho_l \cdot d =$$

$$\sigma_s = \frac{M_1}{A_s \left( d - \frac{x_{II}}{3} \right)} =$$

$$s_{r,max} = 3.4c + 0.425k_1 k_2 \varnothing / \rho_{p,eff} = \quad ,$$

де  $k_1 = 1,6$  (для стержневої арматури);

$k_2 = 0,5$  (при згині).

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{bh_{c,eff}} =$$

$$\min : h_{c,eff} = \begin{cases} 2,5(h-d) = \\ (h-x)/3 = \\ h/2 = \end{cases}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ctm}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} = ,$$

де  $k_t$  – для короткотривалого навантаження, і дорівнює 0,6.

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) =$$

### 2.3. Розрахунок прогину балки

$$x_I = \frac{0,5bh^2 + \alpha_e A_s d}{bh + \alpha_e A_s} =$$

$$I_{ult} = \frac{bh^3}{12} + bh \left( x_I - \frac{d}{2} \right)^2 + \alpha_e A_s (d - x_I)^2 + \alpha_e A'_s (x_I - d)^2 =$$

$$I_{w,ult} = \frac{bx_{II}^3}{3} + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 + \alpha_e A'_s (x_{II} - d)^2 =$$

$$\left( \frac{1}{r} \right)_{uc} = \frac{M_1}{E_{c,eff} I_{ult}} = \quad \left( \frac{1}{r} \right)_{cr} = \frac{M_1}{E_{c,eff} I_{w,ult}} =$$

$$\zeta = 1 - \beta \left( \frac{M_{w,ult}}{M_1} \right)^2 = ,$$

де  $\beta$  – для короткотривалого навантаження і дорівнює 1,0.

$$B = \frac{E_{c,eff} I_{w,ult}}{1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{M_{w,ult}}{M_1} \right) \left( 1 - \frac{I_{w,ult}}{I_{ult}} \right)} = \quad f = \frac{23}{216} \frac{M_1 l_{eff}^2}{B} =$$

Обчислення величини прогинів  $f$  та ширини розкриття тріщин  $w_k$  при  $F_1 = 3 \dots 8$  кН приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

№	$F_1$ , кН	$M_1$ , Н·мм	$\sigma_s$ , МПа	$w_k$ , мм	$\zeta$	$\left(\frac{1}{r}\right)$	$f$ , мм
1	3						
2	4						
3	5						
4	6						
5	7						
6	8						
7	9						

### 3. Наслідки випробування балки

Схема тріщин на боковій поверхні балки показані на рис.1.2.

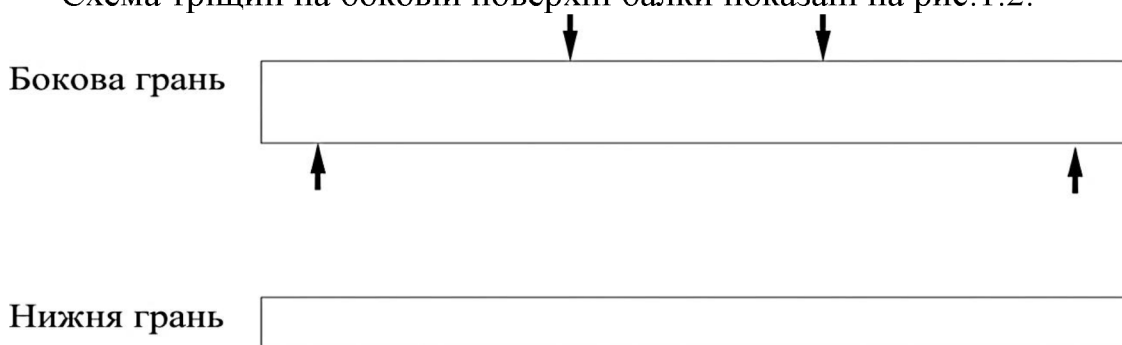


Рис. 1.2

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на розтягнутій арматурі, заносять у табл. 1.3. Графіки відносних деформацій  $\varepsilon_s$  (напружень  $\sigma_s$ ) арматури зображено на рис. 1.3.

Таблиця 1.3

Сила $F_1$ , кН	Тензорезистор Т-1				Тензорезистор Т-2			
	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s =$ $\varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s =$ $\varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Обробка відліків індикатора I-1 та значення ширини розкриття тріщин зведена в табл. 1.4. Графіки прогинів балки (експериментальний та теоретичний) зображені на рис. 1.4.

Таблиця 1.4

Інди- катор	Сила $F_1$ , кН	Відлік $r$	Різниця відліків $\Delta r$	Прогин $f =$ $\sum \Delta r$ , мм	Ширина розкриття тріщин $w_k$ , мм				Примітки
					1	2	3	4	
I-1	0								Ціна поділки індикатора 0,01 мм. Ціна поділки мікроскопа Брінеля 0,1 мм, 0,05 мм
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	7								
	8								
	9								
	10								
	11								
	12								

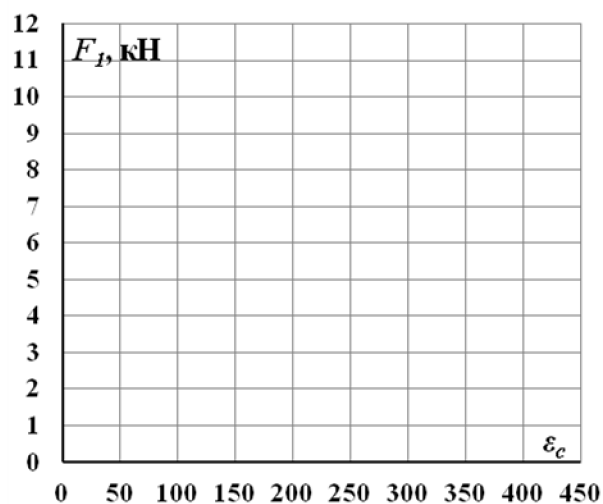


Рис. 1.3. Відносні деформації арматури

$$\varepsilon_s \times 10^5$$

$$(\sigma_s, \text{МПа})$$

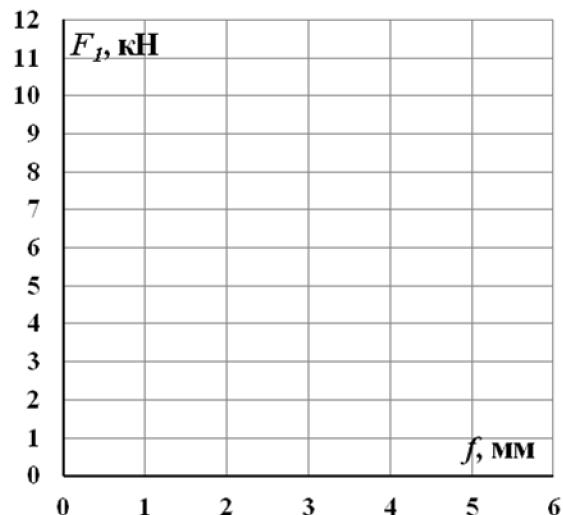


Рис. 1.4. Прогин балки  $f$

————— – дослідна крива  $f_{\text{exp}}$ ;  
 - - - - - – теоретична крива  $f_{\text{teor}}$ ;

Обробка відліків індикаторів I-2, I-3 та I-4 зведена в табл. 1.5. Графіки відносних деформацій бетону стиснутої ( $\varepsilon_c$ ) та розтягнутої ( $\varepsilon_{ct}$ ) зони зображено на рис. 1.5.

Таблиця 1.5

Сила $F_1$ , кН	Індикатор І-2				Індикатор І-3				Індикатор І-3			
	від- лік $r$	різни- ця відлік ів $\Delta r$	абсо- лютна $\sum \Delta r$ , мм	$\varepsilon_c =$ $\frac{\sum \Delta}{l}$	від- лік $r$	різни- ця відлікі в $\Delta r$	абсо- лютна $\sum \Delta r$ , мм	$\varepsilon_c =$ $\frac{\sum \Delta}{l}$	від- лік $r$	різни- ця відлік ів $\Delta r$	абсо- лютна $\sum \Delta r$ , мм	$\varepsilon_c =$ $\frac{\sum \Delta}{l}$
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Примітка: база  $l = 150$  мм, ціна поділки індикаторів 0,001 мм.

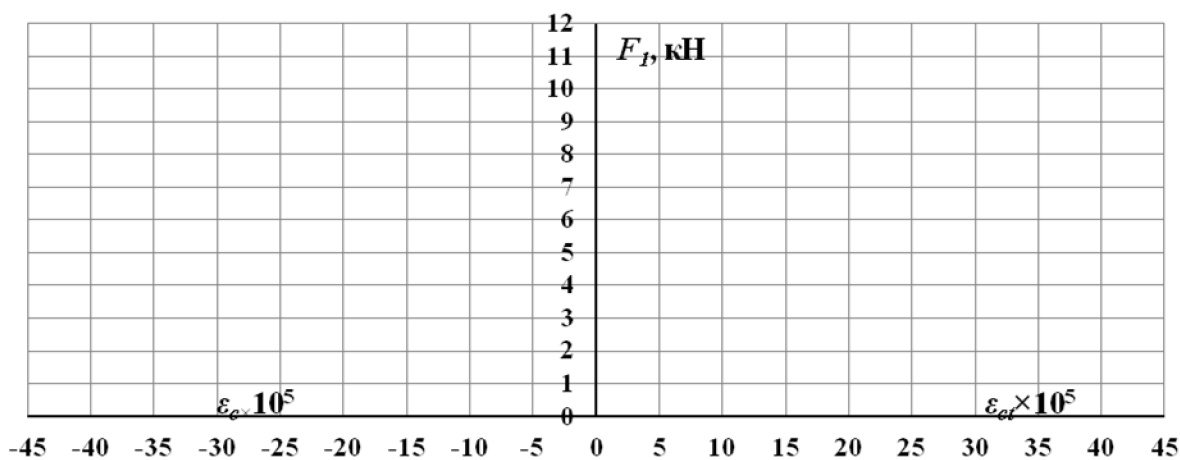


Рис. 1.5

#### 4. Порівняння наслідків випробування та розрахунку. Висновки

$$\frac{|F_{ult,1}^{експ} - F_{ult,1}^{теор}|}{F_{ult,1}^{теор}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{|w_k^{експ} - w_k^{теор}|}{w_k^{теор}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{|F_{w,ult}^{експ} - F_{w,ult}^{теор}|}{F_{w,ult}^{теор}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{|f^{експ} - f^{теор}|}{f^{теор}} \cdot 100\% =$$

### Лабораторна робота № 3

#### Випробування залізобетонної балки на згин при руйнуванні за похилим перерізом

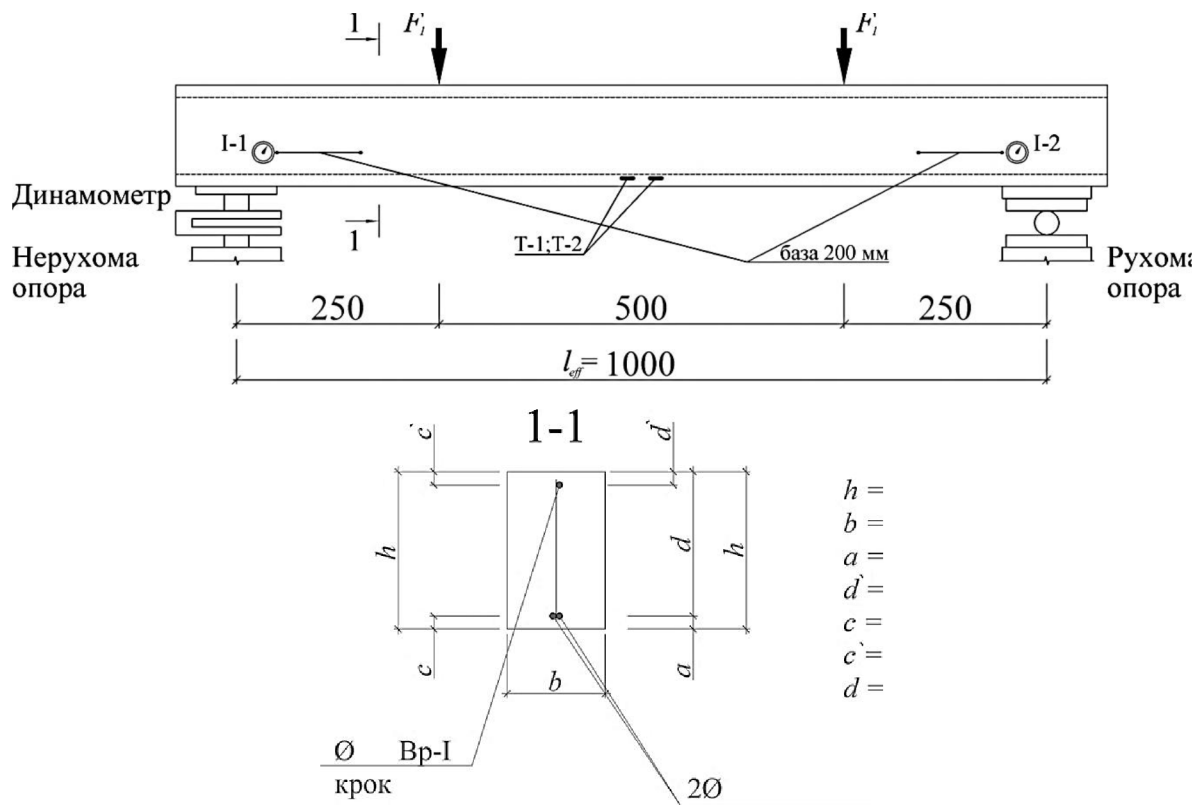


Рис.1.1

#### 1. Протокол випробування

Випробування балки проведено “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Наслідки випробування кубів з ребром 100 мм приведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1

№	Руйнівне зусилля $P$ , Н	Площа перерізу $A$ , $\text{мм}^2$	Кубикова міцність $f_{cm} = P/A$ , МПа
1		1000	
2		1000	
3		1000	

Середнє значення кубкової міцності бетону:

$$f_{cm} = k \sum_{i=1}^{n=3} f_i / n = k(f_{cm,1} + f_{cm,2} + f_{cm,3}) / n = ,$$

де  $k = 0,91$  – коефіцієнт переходу міцності кубів з ребром 100 мм до стандартних кубів з ребром 100 мм;  $n$  – кількість кубів.

Призмova міцність бетону:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64(S_{f_{cm}}) =$  ,

де  $S_{f_{cm}}$  – середнє квадратичне відхилення:

$$S_{f_{cm}} = \sqrt{D(f_{cm})} =$$

$D(f_{cm})$  – дисперсія, що визначається розсіюванням випадкової величини відносно математичного очікування:

$$D(f_{cm}) = \frac{(f_1 - f_m)^2 n_1 + (f_2 - f_m)^2 n_2 + \dots (f_n - f_m)^2 n_n}{n_1 + n_2 + \dots n_n} =$$

Міцність бетону на розтяг:  $f_{ctm} = 0,21 f_{ck}^{2/3} =$

Початковий модуль пружності бетону:

$$E_{cm} = \frac{55000 f_{cm}}{27 + f_{cm}} k_1 = \quad k = 0,9 .$$

Армування балки:

Поздовжня розтягнута арматура:

2Ø\_\_A240  $A_s = 101 \text{ мм}^2$ ;  $f_{yd} =$  МПа;  $E_s =$  МПа;

Поперечна арматура:

\_\_Ø\_B500  $A_s =$  мм<sup>2</sup>;  $f_{ywd} =$  МПа;  $E_s =$  МПа.

Розміри балки та її армування наведені на рис. 1.1.

Розрахунковий переріз призначаємо на відстані  $l = 200$  мм від опори.

## 2. Розрахунок дослідної балки

### 2.1. Розрахунок міцності

1. Зусилля в даному перерізі дорівнюють:

поперечне зусилля  $V_{Ed} = F_1 \cdot l_{eff} / 2 =$  кН,

момент  $M_{Ed} = \frac{F_1 \cdot l}{3} =$  кН·м.

Визначаємо повздовжні відносні деформації в розтягнутій арматурі, кут нахилу тріщини до горизонталі  $\theta = 38^\circ$ :

$$\epsilon_x = \frac{\left( \frac{M_{Ed}}{l} \right) + 0.5 N_{Ed} + 0.5 V_{Ed} \cdot \cot \theta}{E_s A_s} =$$

2. Попередньо визначаємо дотичні напруження, що діють в розглянутому перерізі:

$$v = \frac{V_{Ed}}{b_w l} = \frac{v}{f_{cm}} =$$

3. Визначаємо середні значення головних відносних деформацій розтягу  $\varepsilon_l$  (значення  $\varepsilon_l$  визначаємо ітераційним шляхом):

$$\varepsilon_l = \varepsilon_x + \left[ \varepsilon_x + 0.002 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{v}{f_{cm}} (\tan \theta + \cot \theta) \cdot (0.8 + 170 \cdot \varepsilon_x)} \right) \right] \cdot \cot^2 \theta =$$

4. Ширина розкриття похилої тріщини:

$$w_k = S_{r,\max} \cdot \varepsilon_l = \dots,$$

де  $S_{r,\max} = 300$  мм – відстань між діагональними тріщинами.

5. Визначаємо складову поперечного зусилля, що сприймає бетон (зусилля тріщиноутворення):

$$V_{Rd,c} = f_l \cdot b_w \cdot l \cdot \cot \theta = \quad F_{w,ult} = \frac{V_{Rd,c}}{b_w d} =$$

6. Головні розтягуючі напруження:

$$f_l = \frac{0.18 \sqrt{f_{cm}}}{0.3 + \frac{24 \cdot w_k}{d_g + 16}} \cdot \tan \theta = ,$$

де  $d_g$  – максимальний розмір заповнювача,  $d_g = 20$  мм.

$w_k$  – ширина розкриття похилої тріщини.

7. Визначаємо складову поперечного зусилля, що сприймає поперечна арматура:

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot d_z}{s} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha = ,$$

де  $\alpha$  – кут нахилу поперечної арматури до поздовжньої осі елемента,  $\alpha = 90^\circ$ .

8. Несуча здатність поперечного перерізу:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,sy} = \quad F_{ult,1} = \frac{V_{Rd}}{b_w d} =$$

Обчислення ширини розкриття тріщин  $w_k$  при  $F_1 = 3 \dots 8$  кН приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

№	$F_l, \text{кН}$	$V_{Ed}$	$M_{Ed}$	$\varepsilon_x$	$\nu$	$\nu/fcd$	$\varepsilon_l$	$w_k$	$f_l$	$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,sy}$
	3										
	4										
	5										
	6										
	7										
	8										

### 3. Наслідки випробування балки

Схема тріщин на боковій поверхні балки показані на рис. 1.2.

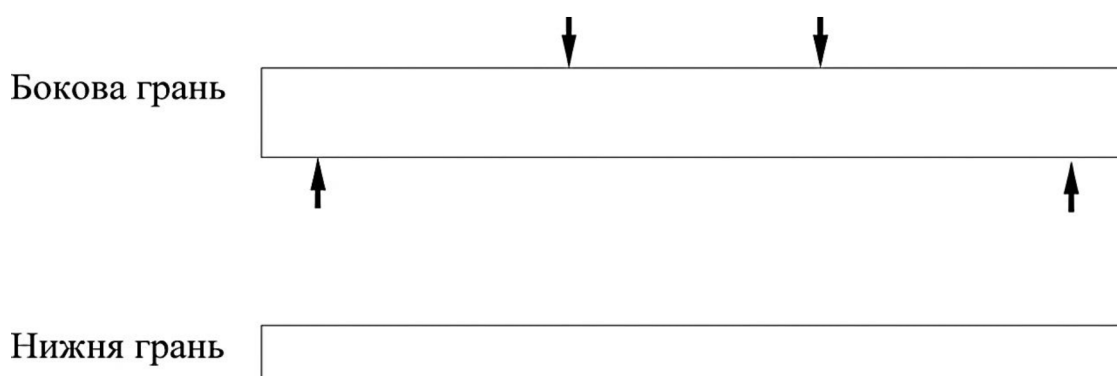


Рис. 1.2

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на розтягнутій арматурі, заносять в табл. 1.3. Графіки відносних деформацій  $\varepsilon_s$  (напружень  $\sigma_s$ ) арматури зображено на рис.1.3.

Таблиця 1.3

Сила $F_l$ , кН	Тензорезистор Т-1				Тензорезистор Т-2			
	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_l \cdot 10^5 =$ $\sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_l \cdot E_s,$ МПа	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_l \cdot 10^5 =$ $\sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_l \cdot E_s,$ МПа
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								

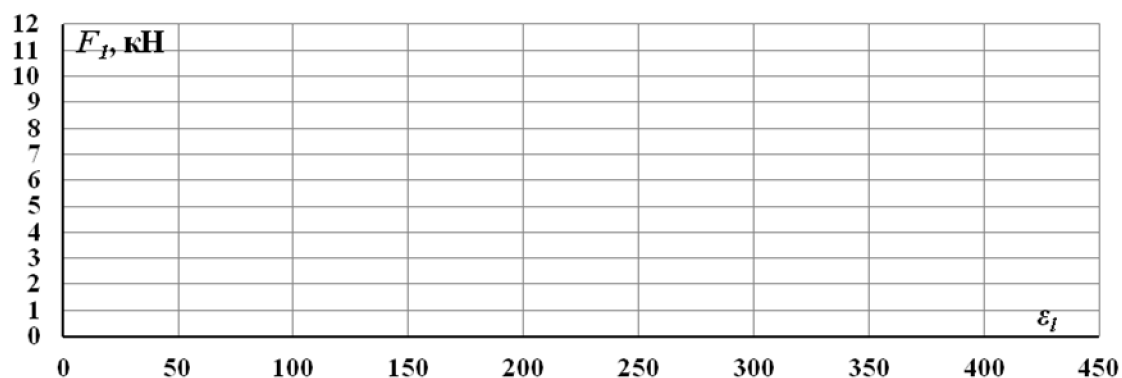


Рис. 1.3. Відносні деформації арматури  $\varepsilon_l \times 10^5$  ( $\sigma_s$ , МПа)

Обробка відліків індикаторів I-1, I-2 зведена в табл. 1.4. Графіки відносних деформацій розтягнутої ( $\varepsilon_{ct}$ ) зони зображено на рис. 1.4.

Таблиця 1.4

Сила $F_1$ , кН	Індикатор I-2				Індикатор I-3				Ширина розкриття тріщин $w_k$ , мм				
	відл ік $r$	різни ця відлі ків $\Delta r$	Деформація		відл ік $r$	різни ця відлі ків $\Delta r$	деформація						
			абсол ютна $\sum \Delta r$ , мм	$\varepsilon_{ct} =$ $\frac{\sum \Delta}{l}$			абсол ютна $\sum \Delta r$ , мм	$\varepsilon_{ct} =$ $\frac{\sum \Delta}{l}$					
									1	2	3	4	
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

Примітка: база  $l = 200$  мм, ціна поділки індикаторів 0,001 мм, ціна поділки мікроскопа Брінеля 0,1 (0,05 мм).

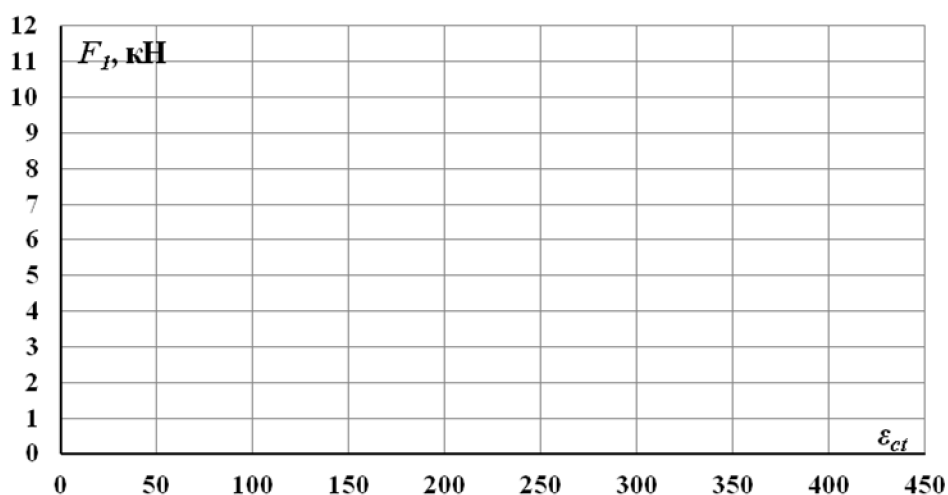


Рис.1.4. Відносні деформації бетону  $\varepsilon_{ct} \times 10^5$

#### 4. Порівняння наслідків випробування та розрахунку. Висновки

$$\frac{|F_{ult,1}^{експ} - F_{ult,1}^{теор}|}{F_{ult,1}^{теор}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{|F_{w,ult}^{експ} - F_{w,ult}^{теор}|}{F_{w,ult}^{теор}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{|w_k^{експ} - w_k^{теор}|}{w_k^{теор}} \cdot 100\% =$$

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Лабораторна робота №4

### Випробування поперечно-напруженої залізобетонної балки

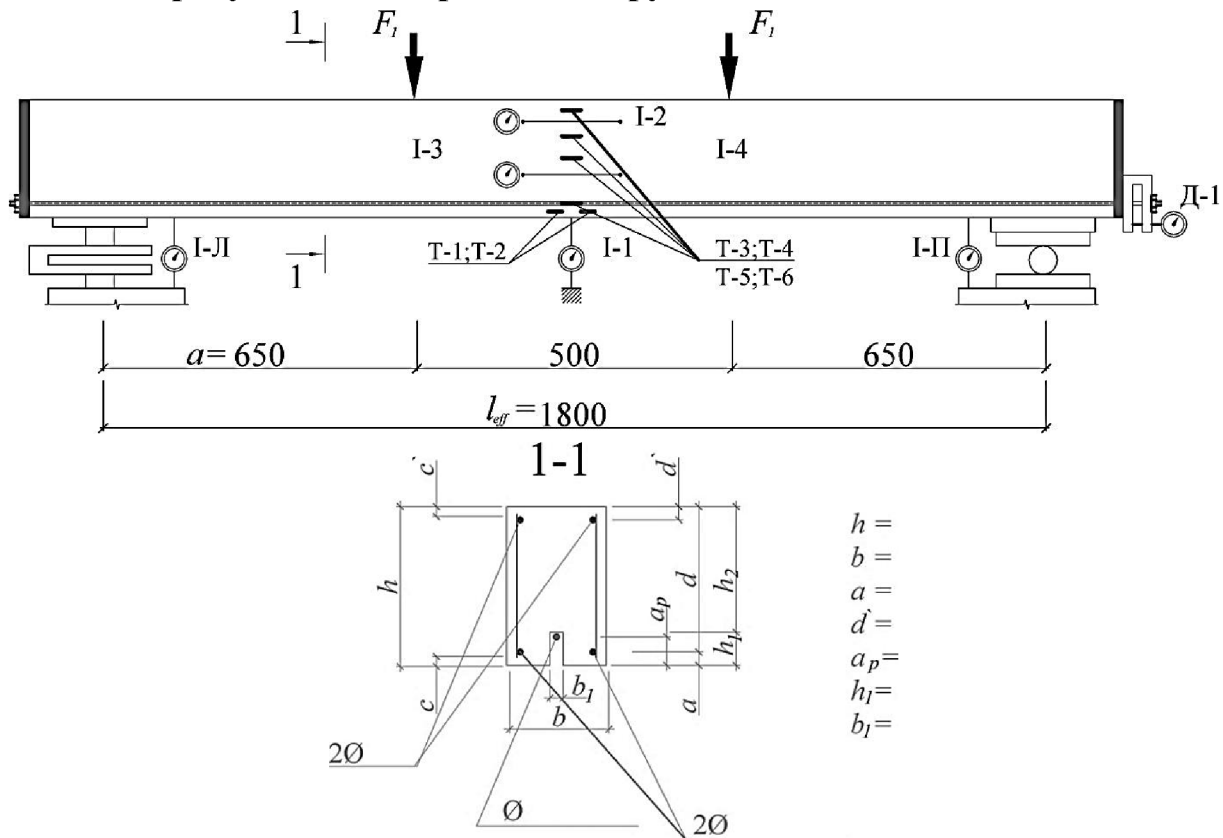


Рис. 1.1

#### 1. Протокол випробування

Випробування балки проведено “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Наслідки випробування кубів з ребром 100 мм приведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1

№	Руйнівне зусилля $P$ , Н	Площа перерізу $A$ , $\text{мм}^2$	Кубикова міцність $f_{cm} = P/A$ , МПа
1		1000	
2		1000	
3		1000	

Середнє значення кубкової міцності бетону:

$$f_{cm} = k \sum_{i=1}^{n=3} f_i / n = k(f_{cm,1} + f_{cm,2} + f_{cm,3}) / n = \quad ,$$

де  $k = 0,91$  – коефіцієнт переходу міцності кубів з ребром 100 мм до стандартних кубів з ребром 100 мм;  $n$  – кількість кубів.

Призмova міцність бетону:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64(S_{f_{cm}}) = \quad ,$

де  $S_{f_{cm}}$  – середнє квадратичне відхилення:

$$S_{f_{cm}} = \sqrt{D(f_{cm})} =$$

$D(f_{cm})$  – дисперсія, що визначається розсіюванням випадкової величини відносно математичного очікування:

$$D(f_{cm}) = \frac{(f_1 - f_m)^2 n_1 + (f_2 - f_m)^2 n_2 + \dots (f_n - f_m)^2 n_n}{n_1 + n_2 + \dots n_n} =$$

Міцність бетону на розтяг:  $f_{ctm} = 0,21 f_{ck}^{2/3} =$

Початковий модуль пружності бетону:

$$E_{cm} = \frac{55000 f_{cm}}{27 + f_{cm}} k_1 = \quad k = 0,9.$$

Армування балки:

Попередньо напружена арматура:

$\varnothing \text{---} A600C: A_p = 201 \text{ мм}^2; f_{pk} = \quad \text{МПа}; E_p = 210000 \text{ МПа};$

Поздовжня розтягнута арматура:

$2\varnothing \text{---} A240C: A_s = 101 \text{ мм}^2; f_{yd} = \quad \text{МПа}; E_s = 210000 \text{ МПа};$

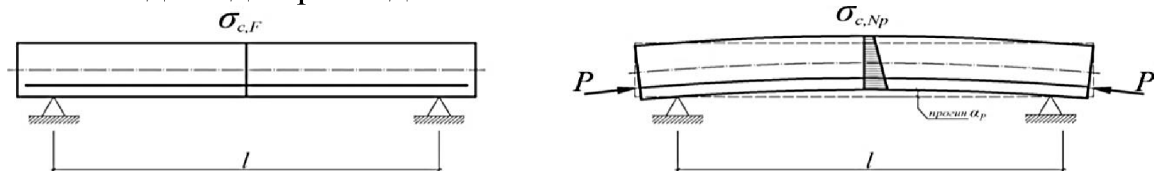
Поздовжня стиснута арматура:

$2\varnothing \text{---} A240C: A_s' = 101 \text{ мм}^2; f_{yd} = \quad \text{МПа}; E_s = 210000 \text{ МПа};$

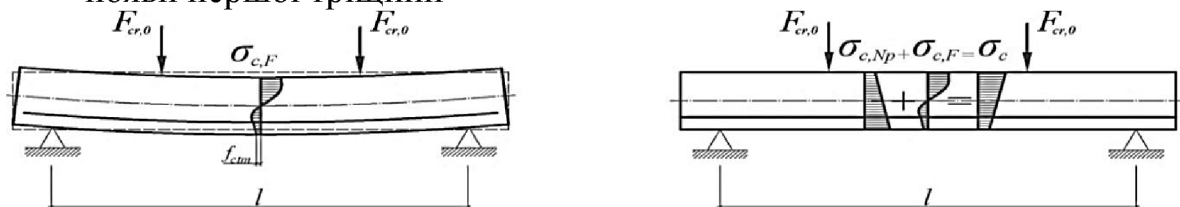
Розміри балки та її армування наведені на рис. 1.1.

## 2. Стадії напружено-деформованого стану згинальних залізобетонних елементів зі звичайною (а) і попередньо напруженою (б) арматурою:

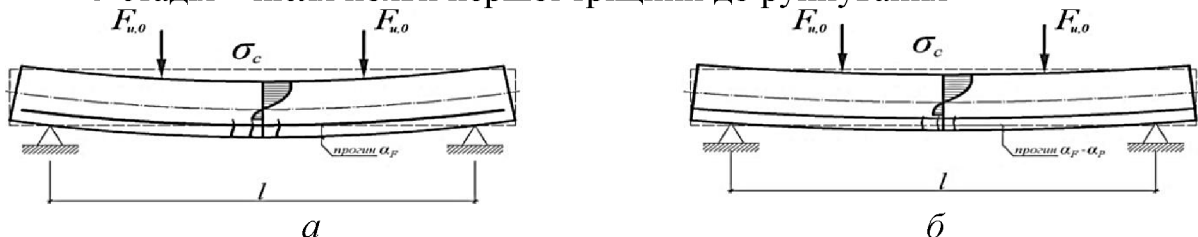
- 1 стадія – до прикладення зовнішнього навантаження



- 2 стадія – від початку прикладення зовнішнього навантаження до появи першої тріщини



- 3 стадія – після появи першої тріщини до руйнування



### 3. Розрахунок дослідної балки

Зчеплення між бетоном та попередньо напруженою арматурою відсутнє, тому під час визначення геометричних характеристик напружена арматура не враховується.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad A_c = bh - b_1h_1 =$$

$$A_{red} = A_c + \alpha_e A_s + \alpha_e A'_s =$$

$$d = h - a_p =$$

$$S_{red} = A_c + \alpha_e A_s a + \alpha_e A'_s (d - d') =$$

$$y = \frac{S_{red}}{A_{red}} =$$

Ексцентриситет зусилля попереднього обтиску відносно осі, що проходить через центр ваги зведеного перерізу,  $e_{op} = y - a_p =$

$$I_{ult} = \frac{bh^3}{12} + bh(0,5h - y)^2 + \alpha_e A_s (y - a)^2 + \alpha_e A'_s (h - y - d')^2 =$$

$$W_{red} = \frac{I_{ult}}{y} \quad W'_{red} = \frac{I_{ult}}{(h - y)} =$$

$$W_{pl} = \gamma W_{red} = \quad W'_{pl} = \gamma W'_{red} =$$

де  $\gamma = 1,75$  – при першому випробуванні;

$\gamma = 1,0$  – при повторних випробуваннях балки;

$$r = 0,8 \frac{W_{red}}{A_{red}} \quad r' = 0,8 \frac{W'_{red}}{A_{red}} =$$

Визначення величини зусилля попереднього обтиску з умови неутворення тріщин на верхній грані балки (від зусилля попереднього обтиску).

$$P \leq \frac{f_{ctk} W'_{pl}}{e_{op} - r}$$

Приймаємо  $P =$

Зовнішнє навантаження (зусилля в домкраті, що контролюється динамометром силового пристрою), яке гасить обтиск нижньої грані

$$F = 2F_1 = \frac{2P(e_{op} + r')}{a} =$$

Призначення величини зовнішнього навантаження, що обумовлює неутворення тріщин на нижній грані балки

$$M \leq M_{w,ult} = f_{ctk} W_{pl} + P(e_{op} + r) =$$

Приймаємо  $M =$  кНм, що відповідає зусиллю в домкраті (контролюється динамометром)

$$F = 2F_1 = \frac{2M}{a} \qquad s = \frac{1}{8} - \frac{a^2}{6l_{eff}^2} =$$

Визначення кривизни та вигину балки від зусилля попереднього обтиску

$$\left(\frac{1}{r}\right)_3 = \frac{P \cdot e_{op}}{\Phi_{b1} E_{cm} I_{ult}} \qquad f_p = \left(\frac{1}{r}\right)_3 s l_{eff}^2 =$$

Визначення кривизни балки від дії зовнішнього навантаження:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{P \cdot e_{op}}{\Phi_{b1} E_{cm} I_{ult}} =$$

Повний прогин балки

$$f = \left[ \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_3 \right] s l_{eff}^2 =$$

*Примітка:*

В даній лабораторній роботі випробувальна балка працює пружно, тобто фактично тріщини в розтягнутій зоні не з'являються. В іншому випадку розрахунок прогинів необхідно виконувати відповідно до вимог ДБН В.2.6-98:2009 (див. лабораторну роботу № 1).

#### 4. Наслідки випробування балки

Обробка відліків індикаторів І-1, І-Л, І-П зведена в табл. 1.2. Графіки прогинів балки (експериментальний та теоретичний) зображено на рис. 1.2.

Таблиця 1.2

Зусилля $P$ , кН	Сила $F_1$ , кН	Момент $M_s =$ $F_1 \cdot a -$ $P e_{op}$	І-І			І-Л			І-П			$f = f_1 -$ $0,5(f_l + f_n)$
			від- лік $r$	різни- ця відліків в $\Delta r$	прогин $f_1 = \sum \Delta r$ , мм	від- лік $r$	різни- ця відліків в $\Delta r$	прогин $f_l = \sum \Delta r$ , мм	від- лік $r$	різни- ця відліків в $\Delta r$	прогин $f_n = \sum \Delta r$ , мм	

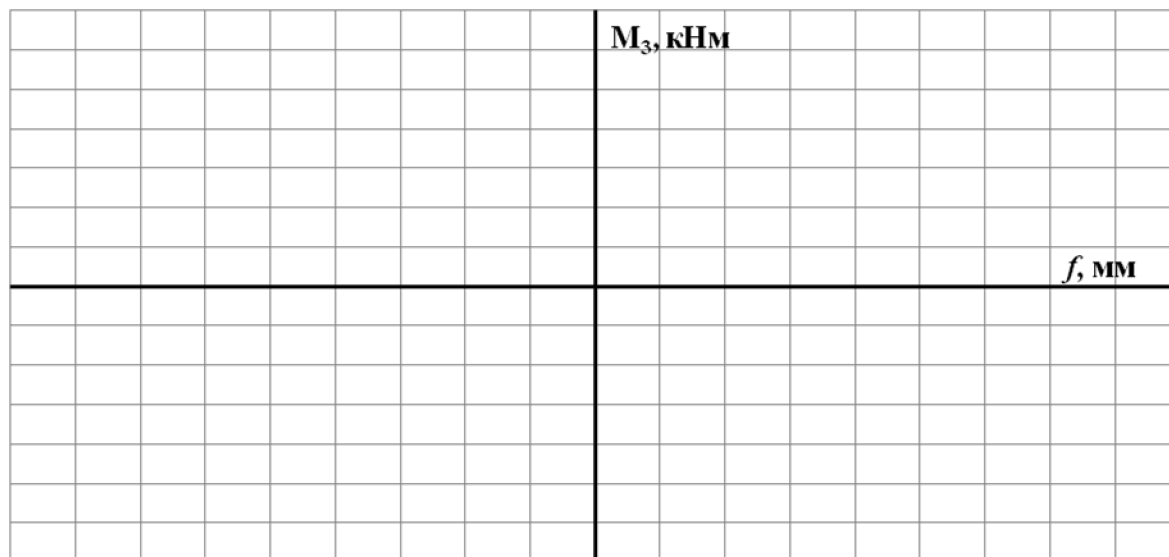


Рис. 1.2

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на розтягнутій арматурі, заносять в табл. 1.3. Графіки відносних деформацій  $\varepsilon_s$  (напружень  $\sigma_s$ ) арматури зображено на рис. 1.3.

Таблиця 1.3

Сила $F_1$ , кН	Тензорезистор Т-1				Тензорезистор Т-2			
	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на бетоні, заносять в табл. 1.4. Графіки відносних деформацій бетону зображено на рис. 1.4.

Таблица 1.4

[illegible]

Обробка відліків індикаторів І-2, І-3 зведена в табл.1.5. Графіки відносних деформацій бетону зображено на рис.1.4-1.5

Таблица 1.5

[illegible]

Примітка: база  $l=150$  мм, ціна поділки індикаторів 0,001 мм.



## Лабораторна робота №5

### Випробування позацентрово стиснутої залізобетонної колони

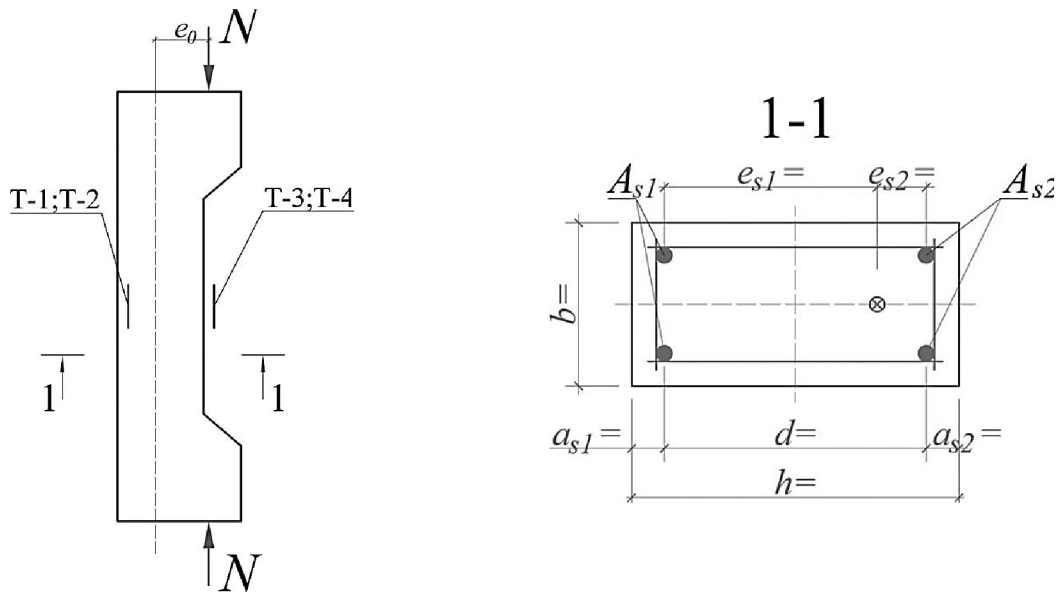


Рис. 1.1. Схема випробування та армування колони

#### 1. Протокол випробування

Випробування балки проведено “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Наслідки випробування кубів з ребром 100 мм приведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1

№	Руйнівне зусилля $P$ , Н	Площа перерізу $A$ , мм <sup>2</sup>	Кубикова міцність $f_{cm} = P/A$ , МПа
1		1000	
2		1000	
3		1000	

Середнє значення кубкової міцності бетону:

$$f_{cm} = k \sum_{i=1}^{n=3} f_i / n = k(f_{cm,1} + f_{cm,2} + f_{cm,3}) / n = \quad ,$$

де  $k = 0,91$  – коефіцієнт переходу міцності кубів з ребром 100 мм до стандартних кубів з ребром 100 мм;  $n$  – кількість кубів.

Призмova міцність бетону:  $f_{ck} = f_{cm} - 1,64(S_{f_{cm}}) = \quad ,$

де  $S_{f_{cm}}$  – середнє квадратичне відхилення:

$$S_{f_{cm}} = \sqrt{D(f_{cm})} =$$

$D(f_{cm})$  – дисперсія, що визначається розсіюванням випадкової величини відносно математичного очікування:

$$D(f_{cm}) = \frac{(f_1 - f_m)^2 n_1 + (f_2 - f_m)^2 n_2 + \dots (f_n - f_m)^2 n_n}{n_1 + n_2 + \dots n_n} =$$

$$\text{Міцність бетону на розтяг: } f_{ctm} = 0,21 f_{ck}^{2/3} =$$

Армування колони:

Поздовжня арматура:

$$2\varnothing \text{---} A240C: A_{s1} = 157 \text{ мм}^2;$$

$$2\varnothing \text{---} A240C: A_{s2} = 157 \text{ мм}^2;$$

$$f_{yd} = \text{МПа};$$

Розміри балки та її армування наведені на рис. 1.1.

## 2. Розрахунок дослідної колони

$$e_{s1} = e_0 + 0,5h - a_{s1} =$$

$$e_{s2} = 0,5h - e_0 - a_{s2} =$$

$$\xi_{eff,lim} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{(\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{so})} =$$

$$B = 1 - \frac{e_{s1}}{d} =$$

$$\mu_{s1} = A_{s1} + \left( \frac{e_{s1} \cdot f_{yd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \right) =$$

$$\mu_{s2} = A_{s2} + \left( \frac{e_{s2} \cdot f_{yd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \right) =$$

$$\xi_{eff} = B + \sqrt{B^2 + 2(\mu_{s1} \pm \mu_{s2})} =$$

Знак “-”, якщо  $e_{s1} \geq d - a_{s2}$ , якщо ні, то знак “+”.

При  $\xi_{eff} \leq \xi_{eff,lim}$ , то

$$N_{Rd} = \xi_{eff} \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + A_{s2} f_{yd} - A_{s1} f_{yd} =$$

$$\text{При } \xi_{eff} > \xi_{eff,lim}, \text{ то } c = \frac{2\mu_{s1}}{1 - \xi_{eff,lim}} =$$

$$\xi_{eff} = B - C \cdot \sqrt{(B - C)^2 + 2(C - \mu_{s1}) \pm \mu_{s2}} =$$

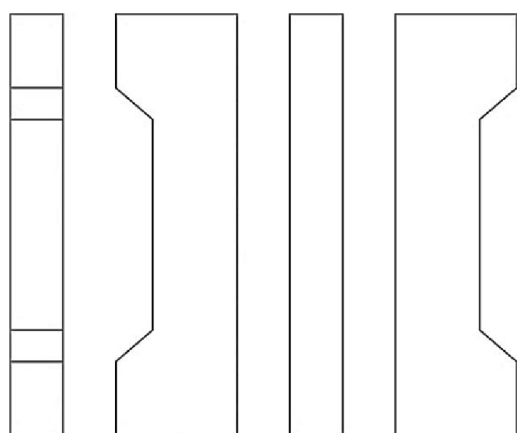
$$k_s = \frac{2(1 - \xi_{eff})}{1 - \xi_{eff,lim}} - 1 =$$

$$N_{Rd} = \xi_{eff} \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + A_{s2} f_{yd} - A_{s1} k_s f_{yd} =$$

Якщо  $\xi_{eff} > 1$ , то прийняти  $\xi_{eff} = 1.0$ ,  $k_s = -1.0$

$$N_{Rd} = 1.0 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + A_{s2} f_{yd} - 1.0 \cdot A_{s1} f_{yd} =$$

### 3. Наслідки випробування колони



#### Описання характеру руйнування колони

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Рис. 1.2. Схема розміщення тріщин

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на розтягнутій арматурі, заносять у табл. 1.2. Графіки відносних деформацій  $\varepsilon_s$  (напружень  $\sigma_s$ ) арматури зображено на рис. 1.3.

Таблиця 1.2

Сила $F_1$ , кН	Тензорезистор Т-1				Тензорезистор Т-2			
	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа	відлік $r$	різниця відліків $\Delta r$	$\varepsilon_s \cdot 10^5$ $= \sum \Delta r$	$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$ , МПа

[illegible]

Рис. 1.3. Відносні деформації арматури  $\varepsilon_s \times 10^5$  ( $\sigma_s$ , МПа)

Обробку відліків тензорезисторів, що розміщені на бетоні в стиснутій зоні, заносять у табл. 1.3. Графіки відносних деформацій бетону  $\varepsilon_c$  зображено на рис. 1.4.

Таблица 1.3

[illegible]

[illegible]

Рис. 1.4. Відносні деформації бетону  $\varepsilon_c \times 10^5$

#### 4. Порівняння наслідків випробування та розрахунку. Висновки

$$\frac{|N^{ecsn} - N^{meop}|}{N^{meop}} \cdot 100\% =$$

---

---

---

---

---

---

Навчально-методичне видання

**ЖУРНАЛ**  
лабораторних робіт  
з курсу залізобетонних конструкцій  
для студентів усіх спеціальностей та форм навчання

Укладачі: **Афанасьєва** Людмила Володимирівна;  
**Журавський** Олександр Дмитрович;  
**Бова** Ярослав Олександрович

Комп'ютерну верстання *Т.І. Кукаревої*

Підписано до друку 2014. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,25.  
Електронний документ. Вид. № 38/III-14.

Видавець і виготовлювач  
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680  
E-mail: red-isdat@ukr.net, тел. (044)241-54-22, 241-54-87

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.