

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи № 4 «Дослідження
розподілення напружень в елементах зварної ферми»
з дисципліни» Розрахунки та проектування зварних
конструкцій»
для студентів освітньої програми «Технології та устаткування
зварювання» усіх форм навчання

2018

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №4 «Дослідження розподілення напружень в елементах зварної ферми» з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» для студентів освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 14 с.

Укладачі: Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент
Капустян О.Є., ст. викладач

Рецензент: Савонов Ю.М., канд. техн. наук, доцент

Редактор: Аверченко І.П., ст. лаб.

Відповідальний за випуск:
Осіпов М.Ю., канд. техн. наук, доцент

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 6
від 31.01.2018

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 6
від 13.02.2018

ЗМІСТ

1 МЕТА РОБОТИ	4
2 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	4
2.1 Визначення зусиль та напружень в елементах ферми розрахунковим методом.....	5
2.1.1 Визначення опорних реакцій.....	7
3 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ.....	8
4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ.....	8
5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ.....	9
6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	10
7 ЗМІСТ ЗВІТУ	13
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	14

1 МЕТА РОБОТИ

Дослідження розподілення напружень в елементах зварної ферми розрахунковим та експериментальним шляхом.

2 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Зварною фермою зветься жорстка геометрично незмінна система стержнів, пов'язаних між собою по кінцях зварними швами. Система незмінна, якщо під дією зовнішніх сил, прикладених до неї, переміщення її точок відбуваються лише в межах пружних деформацій. Точки з'єднань стержнів називаються вузлами ферми, вертикальні стержні ферми – стійки, похилі стержні – розкоси. Сукупність стержнів верхньої частини ферми називають верхнім поясом, стержні нижньої частини – нижнім поясом.

Особливістю роботи ферми, яка правильно спроектована і правильно експлуатується, на відміну від балок, є те, що всі її елементи відчувають тільки поздовжні розтягуючі або стискуючі зусилля. У порівнянні з балками, ферми більш економічні елементи зварних конструкцій.

Для того щоб елементи ферми не відчували згинальні моменти і перерізуючі сили необхідно дотримуватися таких умов:

- а) осьові лінії елементів ферми у вузлах повинні перетинатися в одній точці;
- б) елементи ферми мають бути прямолінійними;
- в) сили, що діють на ферми, вважаються прикладеними тільки у вузлах ферми.

При виконанні цих умов єдиним розрахунковим зусиллям в кожному стержні є поздовжня сила, яка визначається розрахунковими або експериментальними методами. Основними розрахунковими методами визначення зусиль в стержнях ферм є:

- а) метод вирізання вузлів;
- б) метод наскрізних перетинів (або моментних точок), званий також методом Ріттера;

в) графічний спосіб визначення зусиль в стержнях ферм за допомогою побудови діаграми Максвелла-Кремони.

При сучасних обчислювальних засобах рішення систем рівнянь з багатьма невідомими графічний метод останнім часом застосовується досить рідко.

2.1 Визначення зусиль та напружень в елементах ферми розрахунковим методом

Визначення зусиль у стержнях аналітичним способом виконується за допомогою рівнянь статки, являючи собою рівняння проєкцій на вісі або рівняння моментів відносно точки.

Метод вирізання вузлів полягає у послідовному відрізання від ферми її вузлів, які, у даному випадку, мають стояки (рис. 2.1) та аналізу рівноваги кожного з них під дією зовнішньої сили (якщо вона прикладена до цього вузла) та внутрішніх зусиль у розрізаних стержнях, замінюючи дію на вузол відкинutoї частини ферми.



a – вузол I'; *б* – вузол II

Рисунок 2.1 – Приклади урівноваження вирізаних вузлів ферми (рис. 4.1) при визначенні зусиль у стояках

Починають складати рівняння рівноваги для вузлів, в яких з'єднується не більше двох стержнів з невідомими зусиллями. Для кожного вузла складаються два рівняння рівноваги проєкцій сил на осі координат:

З рівнянь визначають зусилля в необхідних стержнях.

Зображуючи сили, що діють з боку стержнів на аналізований

вузол (рис. 2.1), вектори зусиль направляють від вузла, вважаючи стержні ферми розтягнутими. Величини всіх невірно спрямованих на розрахунковій схемі сил виходять зі знаком «мінус» – стержень стиснутий.

Усі зусилля у стержнях позначаємо буквою S з індексом стержня, наприклад S_1, S_2 та ін.

Для виявлення у фермі, яка розраховується, непрацюючих стержнів слід використовувати такі правила:

1) якщо у вузлі сходяться два стержні і навантаження у вузлі немає, обидва стержня не працюють, тобто зусилля в обох стержнях дорівнюють нулю;

2) якщо у вузлі сходяться два стержні і зовнішнє навантаження спрямовано вздовж одного з них, другий стержень не працює, тобто зусилля в ньому дорівнює нулю;

3) якщо у вузлі сходяться три стержні за умови, що два є продовженням один другого і у вузлі відсутнє зовнішнє навантаження, то зусилля в третьому стержні дорівнює нулю (а в перших двох стержнях рівні між собою).

Після визначення всіх можливих зусиль в стержнях методом вирізання вузлів переходимо до визначення решти невідомих зусиль в стержнях методом наскрізних перетинів.

Суть **методу наскрізних перетинів** полягає в наступному:

а) провести переріз крізь три стержня ферми, вісі яких не перетинаються в одній точці;

б) умовно відкинути частину ферми; її дію на залишкову частину замінити внутрішніми зусиллями у перерізаних стержнях;

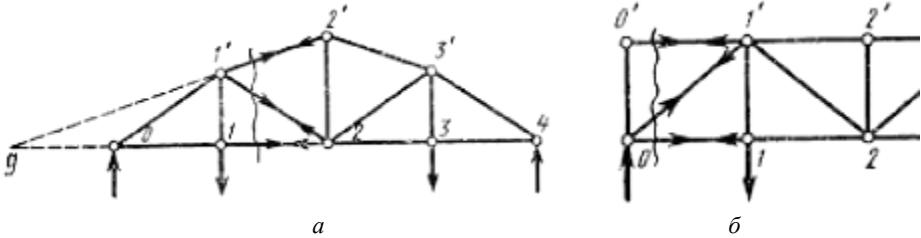
в) скласти рівняння моментів усіх сил, прикладених до розглянутої частини ферми відносно моментової точки; із нього знайти зусилля, що визначається.

Статичні рівняння рівноваги в загальному випадку:

$$\sum M_{1'} = 0; \sum M_2 = 0; \sum M_g = 0,$$

де $1', 2$ і g – моментові точки (рис. 2.2, а).

Точки називаються моментними (або точками Ріттера), якщо вони визначаються перетином двох з перерізаних трьох стержнів ферми.



a – ферма з непаралельними поясами; *б* – ферма з паралельними поясами (фрагмент)

Рисунок 2.2 – Приклади визначення моментних точок при розрахунку ферм

Моментна точка лежить на перетині стержнів 1-2 і 1'-2'; точка 2 – на перетині 1-2 і 1'-2'; точка – на перетині 1-2 і 1'-2' (рис. 2.2 *a*).

Кожне рівняння містить одне невідоме, оскільки інші невідомі зусилля утворюють відносно моментної точки моменти рівні нулю.

При розрахунку ферми з паралельними поясами (рис. 2.2 *б*) моментна точка переміщається в нескінченність, а статичне рівняння рівноваги щодо цієї моментної точки замінюється на рівняння рівноваги проєкцій сил на вісь y і статичні рівняння для ферми з паралельними поясами записуються наступним чином:

Моментні точки – 0 и .

Щоб задача була статично визначальною, в перетин ферми не повинно потрапляти більше трьох стержнів з невідомими зусиллями.

2.1.1 Визначення опорних реакцій

При будь-якому розрахунковому методі розрахунок ферми завжди починається з визначення невідомих сил реакцій в опорних вузлах. Для вирішення цього завдання складаються три рівняння рівноваги для системи всіх зовнішніх сил, що діють на розглянуту ферму:

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0; \sum M_A = 0.$$

Обов'язкова перевірка правильності визначення опорних реакцій, тому що допущена помилка робить марними всі інші розрахунки. Потім приступаємо до визначення зусиль у стержнях ферми методами «вирізання вузлів» і «наскрізних перетинів».

З КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. У чому складається принцип роботи тензорезистора?
2. Як визначаються розрахункові зусилля та напруження у стержнях ферм?
3. У яких стержнях ферми спостерігається постійність напружень за знаком?
4. У яких стержнях ферми напруження змінюються за знаком?
5. У яких випадках при навантаженні ферми стояки працюють як елементи, які підвищують її міцність, а у яких випадках – підвищують її жорсткість?
6. Які вимоги ставляться до вузлів ферми?

4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ

1. Модель зварної ферми з паралельними поясами з наклеєними тензорезисторами (рис. 4.1).

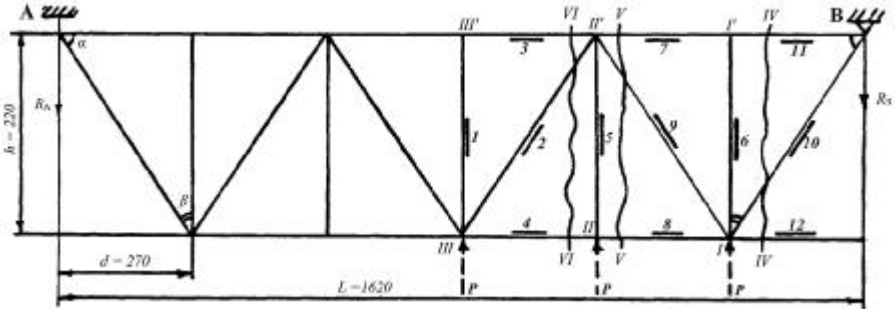
2. Стенд для випробування.

3. Комплект цифрової тензометричної апаратури ЦТК-1.

При визначенні робочих зусиль і напружень у стержнях ферма навантажується зусиллям P почергово у вузлах I, II, III, що дозволяє імітувати дію рухомого навантаження.

Навантаження ферми виконується на спеціальному стенді, який представляє собою жорстку просторову конструкцію. Стенд

складається з чотирьох попарно з'єднаних стояків, які приварені до основи, на котру встановлюється гвинтовий прес.



I, II...III, III' – вузли ферми; 1...12 – номери стержнів і тензорезисторів;
IV...VI – перерізи для визначення зусиль в стержнях ферми методом моментних точок, усі розміри – в мм, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$

Рисунок 4.1 – Схема прикладення навантаження ферми і місця наклею тензорезисторів на її елементи

У якості верхніх зв'язків стояків служать трикутні призми А та В (рис. 4.1), котрі виконують роль опор балки за час її випробування. Навантаження ферми у вузлах I, II і III відбувається за допомогою пересувного гвинтового преса. Величина прогину ферми фіксується індикатором годинникового типу, змонтованим на штанзі.

Дослідження розподілення деформацій та робочих напружень в стержнях ферми відтворюється за допомогою тензорезисторів, наклеєних так, як показано на рис. 4.1 (1,2, 3...12).

5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. До лабораторних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці та пожежної безпеки.

2. Забороняється вмикати електричні прилади та обладнання без дозволу завідуючого лабораторією або викладача.

3. У випадку виявлення неполадок обладнання студент повинен негайно повідомити викладача або завідуючого лабораторією.

4. У випадку виникнення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими

інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Лабораторна робота виконується групою студентів у кількості не більше 4 осіб.

Перед тим, як приступати до виконання лабораторної роботи студент зобов'язаний вивчити дані методичні вказівки, інструкцію по техніці безпеки, відповісти на контрольні запитання викладача та отримати у нього дозвіл на виконання роботи.

1. Ознайомитися з методикою визначення зусиль та напружень у стержнях ферми аналітичними методами.

1.1. Виміряти геометричні параметри ферми (L , d , h , α , β , розміри перерізу стержнів).

1.2. Визначити опорні реакції.

Для ферми, що розглядається (рис. 4.1), при прикладанні навантаження до вузла I опорні реакції можуть бути визначені з таких рівнянь рівноваги:

$$\sum M_A = 0; \quad P \cdot 5d - R_B \cdot L = 0; \quad R_B = \frac{5}{6}P.$$

$$\sum Y_i = 0; \quad -R_A + P - R_B = 0; \quad R_A = \frac{1}{6}P.$$

1.3. Визначити зусилля у стержнях ферми.

Зусилля у стержнях поясів ферми (рис. 4.1) визначаємо способом моментних точок. Для цього проводимо послідовно перерізи IV-IV, V-V, VI-VI. При цьому для визначення зусиль у стержнях верхнього поясу S_{11} , S_7 та S_3 складаємо рівняння моментів відносно моментних точок відповідно I, II та III (рис. 4.1), а зусилля у розкосах S_{10} , S_9 та S_2 визначаємо з рівняння рівноваги $\sum Y = 0$.

Для визначення зусиль у стержнях нижнього поясу S_{12} , S_8 та S_4 складаємо рівняння моментів відносно точок відповідно I', II' та III' (рис. 4.1).

Таким чином, при навантаженні P у вузлі I рівняння мають вигляд:

$$\sum M_I = 0; \quad S_{11} \cdot h - R_B \cdot d = 0; \quad S_{11} = \frac{5 P \cdot d}{6 h};$$

$$\sum y = 0; \quad S_9 \cdot \cos \beta + P - R_B = 0; \quad S_9 = -\frac{1}{6} \frac{P}{\cos \beta};$$

$$\sum M_{II} = 0; \quad S_7 \cdot h + P \cdot d - R_B \cdot 2d + S_9 \cdot \cos \beta \cdot d = 0; \quad S_7 = \frac{5 P \cdot d}{6 h};$$

$$\sum M_{III} = 0; \quad S_3 \cdot h + P \cdot 2d - R_B \cdot 3d = 0; \quad S_3 = \frac{1}{2} \frac{P \cdot d}{h};$$

$$\sum y = 0; \quad -S_{10} \cdot \cos \beta - R_B = 0; \quad S_{10} = -\frac{5}{6} \frac{P}{\cos \beta};$$

$$\sum M_{I'} = 0; \quad -S_{12} \cdot h - R_B \cdot d - S_{10} \cdot \cos \beta \cdot d = 0; \quad S_{12} = 0;$$

$$\sum M_{II'} = 0; \quad -S_8 \cdot h + P \cdot d - R_B \cdot 2d = 0; \quad S_8 = -\frac{2}{3} \frac{P \cdot d}{h};$$

$$\sum y = 0; \quad -S_2 \cdot \cos \beta + P - R_B = 0; \quad S_2 = \frac{1}{6} \frac{P}{\cos \beta};$$

$$\sum M_{III'} = 0; \quad -S_4 \cdot h + P \cdot 2d - R_B \cdot 3d - S_2 \cdot \cos \beta \cdot d = 0; \quad S_4 = -\frac{2}{3} \frac{P \cdot d}{h}.$$

Для визначення зусилля у стояку S_6 скористаємося методом вирізання вузлів і розглянемо умову рівноваги вузла Γ (рис. 2.1 а). Даний вузол знаходиться у рівновазі під дією зусиль у стержнях S_{11} , S_7 та S_6 .

З рівняння $\sum Y = 0$ та згідно правилу 3 (с. 6) отримуємо, що зусилля $S_6 = 0$.

Згідно тому ж правилу зусилля у стояках S_1 та S_5 також дорівнюють нулю ($S_1 = 0$, $S_5 = 0$).

Аналогічно визначаємо зусилля у стержнях ферми від навантаження прикладеного у вузлах II та III (рис. 4.1).

Зусилля у стержнях лівої половини ферми слід прийняти рівним зусиллям у відповідних симетричних стержнях правої половини при,

відповідно, навантаженні вузлів, розміщених у лівій частині ферми.

1.4. Використовуючи аналітичний метод по знайденим зусиллям у стержнях ферми розрахувати робочі напруження у стержнях ферми при її навантаженні зовнішнім зусиллям $P = 1$ тс по формулі (6.1) та ці дані занести до табл. 6.1.

$$\sigma = \frac{S_n}{F}, \quad (6.1)$$

де S_n – зусилля у стержні, Н (або кгс);

F – площа перерізу стержня ферми, м^2 (або см^2).

Таблиця 6.1 – Результати визначення зусиль і напружень у стержнях ферми розрахунковим методом

Номер стержня	Зусилля у стержні, Н			Напруження у стержні, МПа		
	п р и н а в а н т а ж е н н і в у з л а					
	I	II	III	I	II	III
1						
...						
...						
12						

1.5 Виконати графічне представлення результатів розподілу напружень в стержнях верхнього і нижнього поясів, в стояках, в розкосах залежно від місця докладання зовнішнього навантаження (вузли I, II, III).

2. Визначення деформації та напружень електротензометричним методом.

2.1. Вивчити методику вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторів.

2.2. Ознайомитися зі стендом для іспиту ферми.

2.3. Зняти початкові показання електронного вимірювача деформацій (АВ) до навантаження балки за усіх тензорезисторів й отримані дані (N_1) занести до табл. 6.2.

2.4. Навантажити ферму у вузлі I зусиллям $P = 10^6$ Па (1 тс).

2.5. Зняти повторні показання приладу АВ з усіх тензорезисторів при навантаженій фермі та результати N_2 занести до табл. 6.2.

При цьому, у процесі зняття показань N_2 при почерговому підключенні усіх тензорезисторів, величина прогину ферми повинна

додержуватися постійною.

2.6. Зняти навантаження з ферми у вузлі І.

2.7. Повторити дії, вказані в п.п. 6.2.3 – 6.2.6 при послідовному навантаженні ферми у вузлах ІІ та ІІІ.

2.8. Отримані дані (N_1 та N_2) занести до таблиці 6.2.

2.9. Розрахувати деформацію ε та напруження σ по формулам (4.2) і (4.3) та отримані результати занести до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати визначення деформації та напружень у стержнях ферми експериментальним методом

Номер тензо- рези- стора	При навантаженні вузла											
	І				ІІ				ІІІ			
	$N_1,$ 10^{-5}	$N_2,$ 10^{-5}	$\varepsilon,$ 10^{-5}	$\sigma,$ Мпа	$N_1,$ 10^{-5}	$N_2,$ 10^{-5}	$\varepsilon,$ 10^{-5}	$\sigma,$ Мпа	$N_1,$ 10^{-5}	$N_2,$ 10^{-5}	$\varepsilon,$ 10^{-5}	$\sigma,$ Мпа
1												
2												
...												
...												
12												

3. Зрівняти експериментальні результати (табл. 6.2) з аналітичними розрахунками (табл. 6.1), підготувати висновки по виконаній роботі, оформити звіт.

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Вступ.
3. Прибори та обладнання.
4. Схема навантаження.
5. Схема підключення тензорезисторів.
6. Розрахунок деформації та напружень.
7. Результати аналітичного та експериментального дослідження деформацій та напружень у вигляді табл. 6.1 і 6.2.
8. Графіки розподілення напружень по перерізу балки, отриманих розрахунковим та дослідним методами.
9. Аналіз отриманих результатів.
10. Висновки по виконаній роботі.

8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г.А. Николаев, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
2. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А.Н. Серенко, М.Н. Крумбольт, К.В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 336 с.
3. Логинов В.И. Электрические измерения механических величин / В.И. Логинов. – М.: Энергия, 1976. – 103 с.