

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №3
«Дослідження розподілення напружень у зварній двотавровій
балці»

з дисципліни
«Розрахунки та проектування зварних конструкцій»

для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка
освітньої програми «Технології та устаткування зварювання»
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №3 «Дослідження розподілення напружень у зварній двотавровій балці» з дисципліни «Розрахунки та проектування зварних конструкцій» для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 17 с.

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

Рецензент: Лаптева Г.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 ІТЗ та МК
Протокол №01 від 13.09.2023 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №06 від 16.01.2024 р.

ЗМІСТ

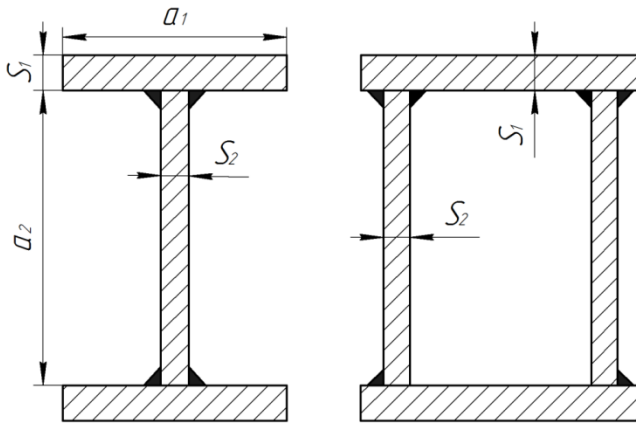
1 МЕТА РОБОТИ	4
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
2.1 Визначення деформацій та напружень в балці розрахунковим методом	7
2.2 Визначення деформацій та напружень в балці експериментальним методом	10
3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ	11
4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ	12
5 ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	14
6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ	15
7 ЗМІСТ ЗВІТУ	16
8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	17

1 МЕТА РОБОТИ

Дослідження розподілення нормальних та дотичних напружень у зварній балці розрахунковим та експериментальним шляхом.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Зварні балки знаходять широке застосування в елементах металоконструкцій, працюючих в основному на поперечний згин. Їх застосовують в конструкціях будівель, мостів, естакадах, у складі рам вагонів, кранів, станин та інших металевих конструкцій і машин. Найбільш часто використовують зварні балки двотаврового (рис. 2.1 а) та коробчастого перерізу (рис. 2.1 б).



а – двотавровий переріз; б – коробчастий переріз

Рисунок 2.1 – Приклади перерізів балок

Двотаврові балки добре пручаються вигину в площині своєї найбільшої жорсткості, коробчасті – вигину в різних площинах і крученню.

Зварні балки виготовляються з висотою стінки до декількох метрів. Для виготовлення стінок і поясів балок, залежно від умов експлуатації, можуть застосовуватися як маловуглецеві, так і низьколеговані сталі, а в особливих випадках – алюмінієві і титанові

сплави.

При проектуванні балки проводять розрахунки на жорсткість і міцність, а також виконують перевірки на загальну і місцеву стійкість її окремих елементів. Ці розрахункові методи засновані на використанні формул з курсу «Опір матеріалів».

При аналізі напружено-деформованого стану зварних конструкцій одних розрахункових методів часто виявляється недостатньо. Тому поряд з розрахунковими широко застосовуються і експериментальні методи визначення деформацій і напружень конструкцій.

Одним з найбільш розповсюджених методів експериментального дослідження напруженого стану конструкцій є електротензометрування. Електротензометричний метод базується на використанні тензорезисторів.

Конструктивно тензорезистор складається з паперової або плівкової підкладки, на якій за допомогою клею укріплений чутливий елемент – константовий (мідь-нікелевий сплав) тензометричний дріт діаметром 0,012 мм – 0,5 мм. Коефіцієнт тензометричної чутливості константового дроту практично не змінюється аж до руйнування. Чутливий елемент виконується у вигляді петлеподібної решітки різної конфігурації. З чутливим елементом електрично з'єднані вивідні провідники. Тензорезистори наклеюють на об'єкт дослідження, котрі після прикладення навантаження деформуються разом з ним.

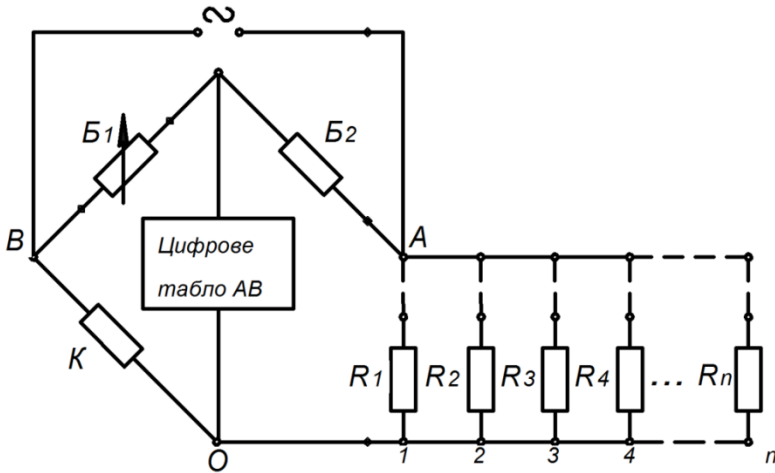
В основу роботи тензорезистора покладена залежність активного (омічного) опору провідника R (Ом) від його довжини l (м), перерізу провідника F (м²) і питомого опору ρ (Ом·м):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{F}.$$

При дії на балку розтягуючих або стискаючих деформацій будуть змінюватися геометричні розміри (в першу чергу довжина l) провідника тензорезистора і, як результат, його опір.

При визначенні деформацій дротовими тензорезисторами важливо уникнути помилки вимірювання за рахунок змінення температури деталі, що викликає змінення: по-перше, питомого опору матеріалу тензорезистора, по-друге, довжини дроту тензорезистора; по-третє, лінійних розмірів об'єкту тестування. Вплив цих явищ необхідно

виключити. Одним із розповсюджених методів компенсації впливу змінення температури є застосування декількох однакових тензорезисторів, з котрих одні наклеєні на модель балки ($R_1, R_2, \dots R_n$), а інший (K) – на ненавантажену пластину з того ж матеріалу, що знаходиться у тих же температурних умовах, що і модель. Ці тензорезистори вмикаються в сусідні плечі мостової схеми (рис. 2.2) та цим автоматично компенсуються температурні явища.



B_1, B_2 – баластні тензорезистори; $R_1, R_2, \dots R_n$ – робочі тензорезистори;
 K – компенсаційний тензорезистор

Рисунок 2.2 – Схема вимірювання напружень в перерізах балки

При визначенні одноосних напружень в елементах конструкції тензорезистори орієнтують у напрямку діючої сили, що при роботі матеріалу в пружній стадії, відповідно до закону Гука, дає можливість визначити зв'язок між деформаціями і напруженнями по формулі:

$$\sigma = \varepsilon E = \frac{\Delta l}{l} E,$$

де σ – напруження в перерізі, МПа (кгс/см²);

ε – відносна деформація, виміряна тензорезистором;

E – модуль пружності (модуль Юнга) досліджуваного матеріалу, МПа, для сталі $E = 0,21 \cdot 10^6$ МПа ($2,1 \cdot 10^6$ кгс/см²);

Δl – подовження або укорочення довжини l тензорезистора при навантаженні, м (або см).

Дослідження характеру розподілення напружень виконується в перерізі двоопорної балки висотою h при навантаженні зосередженою силою P на половині її довжини L , де виникають максимальна стріла прогину f і максимальні напруження (рис. 2.3).

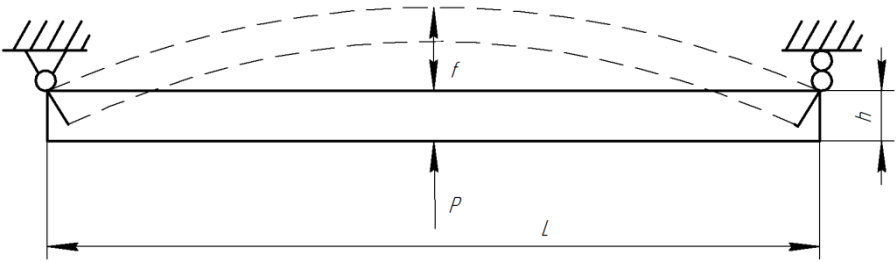


Рисунок 2.3 – Схема прикладення навантаження на двоопорну балку
Дослідження розподілення напружень в балці виконаємо розрахунковим та експериментальним шляхом.

2.1 Визначення деформацій та напружень в балці розрахунковим методом

При проектуванні зварних балок їх розглядають як балки, що лежать на двох опорах й навантаженні зосередженою силою або рівномірно розподіленим навантаженням.

Умова міцності у випадку навантаження зосередженою силою (рис. 2.3) має вигляд:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma]_p, \quad (2.1)$$

де σ – максимальне напруження в стінці балки, що викликається дією згинаючого моменту у заданому перерізі, МПа (кгс/см²);

M – згинаючий момент від прикладеної сили P в перерізі на половині довжини балки, Н·м (кгс·см);

W_x – момент опору перерізу балки, м³ (см³);

$[\sigma]_p$ – допустимі напруження при розтягуванні, МПа (кгс/см²).

Від згину в балці виникають напруження:

$$\sigma = \frac{M}{J_x} \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.2)$$

де J_x – момент інерції перерізу відносно осі x , м^4 (см^4);
 h – висота балки, м (см).

При цьому мають місце дві зони (рис. 2.2). На ділянці завширшки $\left(-\frac{h}{2}\right)$ – напруження стиску, а на ділянці $\left(+\frac{h}{2}\right)$ – напруження розтягу. Характер розподілення нормальних напружень σ по висоті балки від згину представлено епюрою на рис. 2.4.

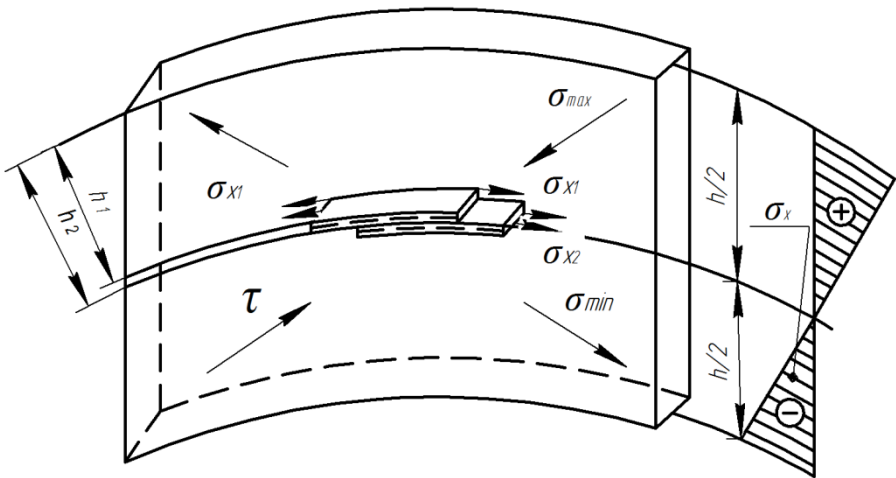


Рисунок 2.4 – Розподіл нормальних напружень по висоті балки

Крім того, в результаті згину різні шари металу, які залягають на різних рівнях (h_1 , h_2), зміщуються відносно один одного, викликаючи появу між шарами дотичних напружень.

Дотичні напруження τ у свою чергу відповідальні за виникнення нормальних напружень σ_{max} та σ_{min} (рис. 2.4).

Таким чином, в результаті згину в стінці балки розвиваються нормальні напруження стиску, котрі в деяких місцях стінки можуть перевищити значення σ_T та викликати втрату плоскої форми рівноваги, тобто випучування (видуття) стінки.

Дотичні напруження τ визначаються за формулою:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{J_x \cdot \delta_{ст}}, \quad (2.3)$$

де Q – найбільша поперечна сила балки, Н (в даному випадку $Q = \frac{P}{2}$);

S_x – статичний момент полуплощі перерізу відносно центра ваги перерізу балки, м³;

$\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки балки, м.

Характер розподілення дотичних напружень в стінці двотаврової балки показано на рис. 2.5, з якого видно, що дотичні напруження максимальної величини виникають в перерізі, розташованому на нейтральній вісі.

Напруження $\sigma_{\max}$ та $\sigma_{\min}$ визначаються по відомим формулам теорії пружності:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (2.5)$$

де $\sigma_{\max}$ та $\sigma_{\min}$ – нормальні напруження в стінці балки від дії згинаючого моменту.

Для двотаврових балок приймаємо, що $\sigma_y = 0$, а напруження σ_x визначається по формулі:

$$\sigma_x = \frac{M}{J_x} \cdot \frac{h_i}{2}, \quad (2.6)$$

де h_i – відстань до шару, що досліджується в перетині балки, м.

Таким чином для зварної двотаврової балки:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (2.8)$$

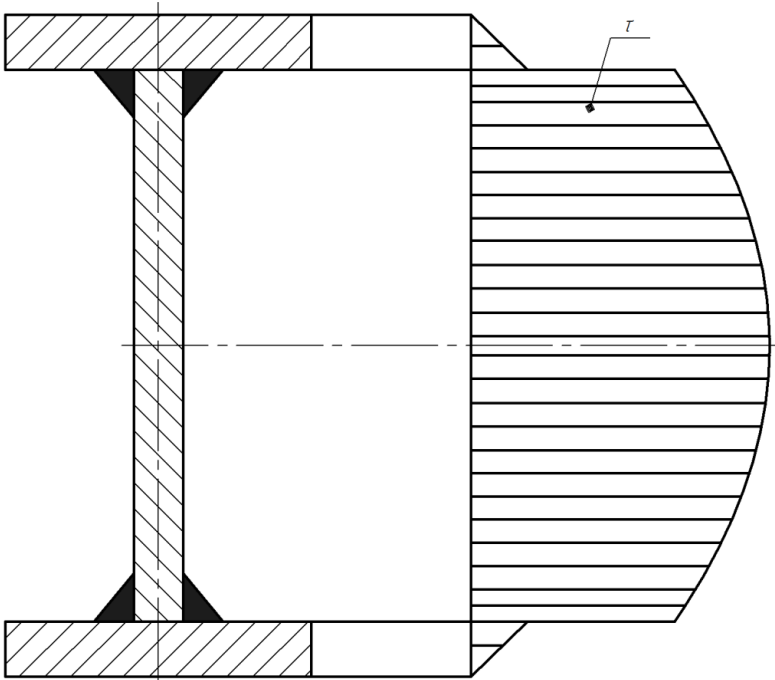


Рисунок 2.5 – Розподіл (епюра) дотичних напружень τ по висоті балки

Значення σ_x , σ_{max} та σ_{min} залежать від величини прогину балки f під дією згинаючого моменту від прикладеного навантаження P . Величина прогину визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{L^3 P}{E J_x}, \quad (2.9)$$

де L – довжина балки між опорами, м;

E – модуль пружності матеріалу, МПа;

J_x – момент інерції перерізу відносно осі x , м⁴.

2.2 Визначення деформацій та напружень в балці експериментальним методом

При підготовці комплекту апаратури ЦТК-1 (рис. 4.3) до роботи, ціна поділки приладу АВ приведена у відповідності з тензометричною

чуттєвістю ($K = 2$) застосованих тензорезисторів і складає у відносних одиницях деформації (в.о.д.):

$$\text{в. о. д.} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta l}{l}.$$

Таким чином, абсолютним значенням відносної деформації у даному перерізі балки є різниця абсолютних значень показань приладу початкового $N_1 \cdot 10^{-5}$ при ненавантаженій балці, та повторного $N_2 \cdot 10^{-5}$ при навантаженій балці, тобто:

$$\varepsilon = N_2 \cdot 10^{-5} - N_1 \cdot 10^{-5}. \quad (2.10)$$

Напруження визначається по формулі:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (2.11)$$

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І КОНТРОЛЮ ПІДГОТОВЛЕНOSTІ СТУДЕНТІВ ДО РОБОТИ

1. Чому у схемі прикладення навантаження, прийнятій у даній роботі, найбільшу цікавість представляють напруження в перерізі на половині довжини балки?

2. Як визначаються нормальні напруження в балках?

3. Як визначаються дотичні напруження в балках?

4. Як визначається прогин балки?

5. Де розташовуються тензорезистори?

6. Яким чином при вимірюванні деформацій дротовими тензорезисторами компенсуються температурні явища?

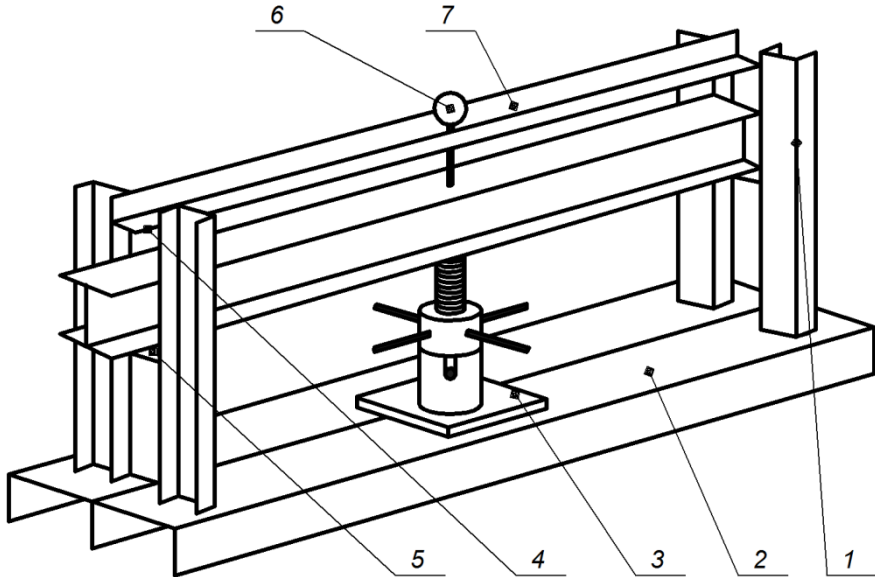
7. Як розподіляються нормальні та дотичні напруження по висоті вертикального полотна балки?

4 МАТЕРІАЛИ, ІНСТРУМЕНТ, ПРИЛАДИ, ОБЛАДНАННЯ

1. Модель зварної балки з наклеєними тензорезисторами.
2. Стенд для випробування.
3. Комплект цифрової тензометричної апаратури ЦТК-1.

В якості об'єкта дослідження прийнята модель зварної балки двотаврового профілю, виготовленої зі сталі Ст3.

Навантаження балки виконується на спеціальному стенді (рис. 4.1), який представляє собою жорстку просторову конструкцію. Стенд складається з чотирьох попарно з'єднаних стояків 1, які приварені до основи 2, на котру встановлюється гвинтовий прес 3.



- 1 – стояк; 2 – основа; 3 – гвинтовий прес; 4 – призма; 5 – з'єднувальна планка;
6 – індикатор годинникового типу; 7 – штанга

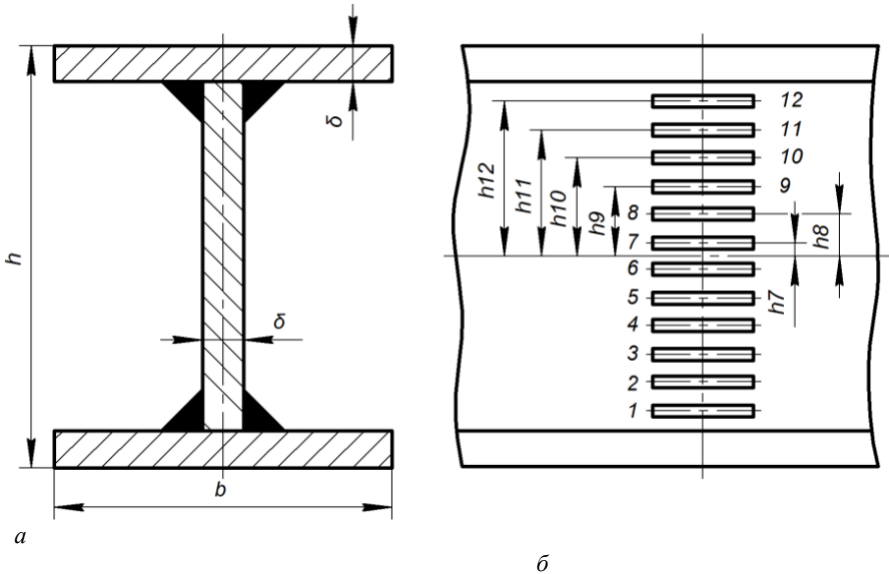
Рисунок 4.1 – Стенд для випробування двотаврових балок

У якості верхніх зв'язків стояків 1 служать трикутні призми 4, котрі виконують роль опор балки за час її випробування.

Для випробування балка встановлюється на нижні з'єднувальні планки 5. Потім на початковій стадії навантаження за допомогою гвинтового преса 3 відбирається люфт і балка піджимається до граней опорних призм 4, що забезпечує її лінійний дотик з опорами. Величина

прогину балки фіксується індикатором 6, змонтованим на штанзі 7.

Дослідження розподілення деформацій та нормальних напружень від згину по висоті вертикального полотна балки відтворюється за допомогою тензорезисторів наклеєних так, як показано на рис. 4.2.

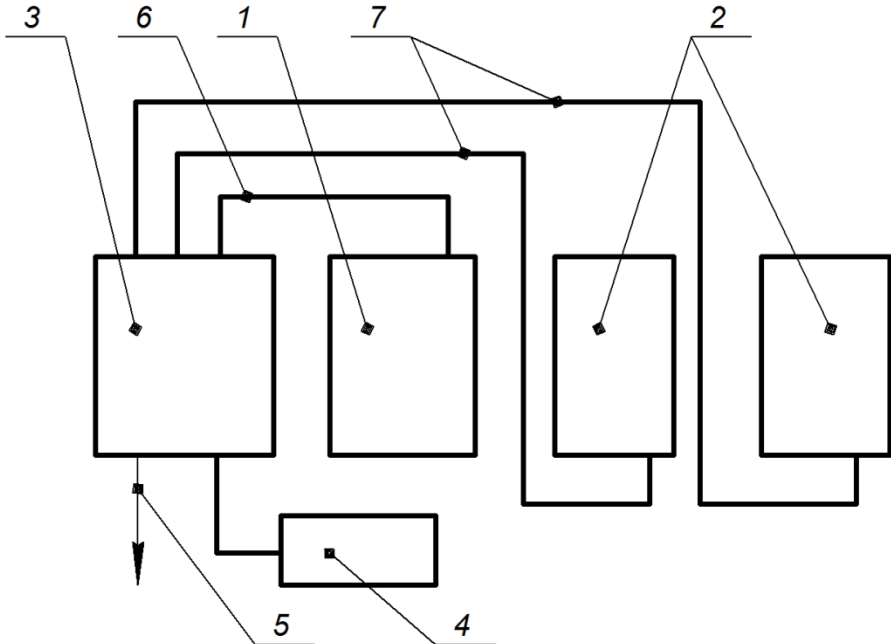


a – переріз балки; b – 1...12 – номери тензорезисторів (перерізів)

Рисунок 4.2 – Випробувана балка

Для виміру деформацій в перерізах балки дослідним шляхом застосовується комплект цифрової тензометричної апаратури ЦТК-1 (рис. 4.3), який забезпечує автоматичне зчитування показань та їх вивід на цифрове табло, автоматичне або ручне переключення видачі показань у десятинній формі у зовнішній ланцюг.

Прилад ЦТК-1 складається з автоматичного електронного вимірювача деформацій АВ (поз. 1), двох 100-позиційних автоматичних прецизійних перемикачів АП (поз. 2), блока управління та живлення (поз. 3), кнопкового пульта (поз. 4) та з'єднувальних кабелів (поз. 5-7).



1 – автоматичний електронний вимірювач деформацій АВ; 2 – 100-позиційний прецизійний перемикач АП; 3 – блок керування та живлення; 4 – кнопковий пульт; 5, 6, 7 – з'єднувальні кабелі

Рисунок 4.3 – Блок-схема приладу ЦТК-1

У вимірювальному приборі ЦТК-1 компенсаційний (К) та робочі тензорезистори складають зовнішній напівміст, а баластні (B_1 і B_2) – внутрішній напівміст (рис. 2.2). Послідовне перемикання робочих тензорезисторів ($R_1, R_2, \dots R_n$) здійснюється при натисканні кнопки перемикача (АП) електронного вимірювача деформацій АВ.

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

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. Визначення величини та характеру розподілення напружень по висоті вертикального полотна зварювальної двотаврової балки за допомогою формул теорії пружності.

1.1. Виміряти розміри перерізу балки та визначити її момент інерції (J_x).

1.2. По формулі (2.9) визначити навантаження P , при якому балка отримує прогин $f = 1$ мм.

1.3. Визначити по формулі (2.6) величину нормальних напружень σ_x в точках 6 і 7, 5 і 8, 4 і 9, 3 і 10, 2 і 11, 1 і 12 по висоті балки в перерізах 1–12, відповідно місцям наклейки тензорезисторів (рис. 2.5 б).

1.4. У відповідності зі схемою прикладення навантаження визначити знаки напружень σ_{1-6} і σ_{7-12} у верхній та нижній частинах балки від нейтральної вісі.

1.5. По формулі (2.3) визначити величину максимальних дотичних напружень.

1.6. По формулам (2.7) та (2.8) визначити напруження σ_{max} та σ_{min} . Отримані в результаті розрахунку дані, занести у табл. 6.1.

2. Визначення деформації та напружень електротензометричним методом.

2.1. Вивчити методику вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторів.

2.2. Ознайомитися зі стендом для дослідження навантаження балки.

2.3. Зняти початкові показання електронного вимірювача

деформацій (AB) до навантаження балки з усіх тензорезисторів й отримані дані (N_1) занести в табл. 6.2.

Таблиця 6.1 – Результати розрахунку напружень у перерізах балки

Номера перерізів, у яких визначались напруження (рис.4.2)	Напруження, МПа			
	σ_{σ_x}	σ_{max}	σ_{min}	τ_{xy}
1				
...				
12				

Таблиця 6.2 – Результати експериментального визначення деформації та напружень у перерізах балки

Номер перерізу балки	$N_1 \cdot 10^{-5}$	$N_2 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	σ , МПа
1				
...				
12				

2.4. Виконати навантаження балки, забезпечивши їй прогин $f = 1$ мм, величина котрого фіксується за допомогою індикатора (рис. 2.4).

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

При цьому, у процесі зняття показань N_2 при почерговому підключенні усіх тензорезисторів, величина прогину балки $f = 1$ мм повинна додержуватися постійною.

2.6. Визначити деформацію ε та напруження σ (розд. 2). Отримані результати занести у табл. 6.2.

7 ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Вступ.
3. Прибори та обладнання.
4. Схеми навантаження і підключення тензорезисторів.
5. Розрахунок деформації та напружень.
6. Результати аналітичного та експериментального дослідження деформацій та напружень у вигляді табл. 6.1 і 6.2.

7. Графіки розподілення напружень по перерізу балки, отриманих розрахунковим та дослідним методами.

8. Висновки по виконаній роботі і аналіз отриманих результатів.

8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций / А.Н Серенко, М.Н. Крумбольт, К.В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 336 с.

2. Чертов І.М. Зварні конструкції: Підручник / І.М. Чертов. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.