

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи № 3 "Дослідження розподілення
напружень в зварної двотавровій балці"

з дисципліни

"Розрахунок зварних конструкцій"

для студентів напряму підготовки 6.050504 "Зварювання"

усіх форм навчання

2015

Методичні вказівки до лабораторної роботи №3 "Дослідження розподілення напружень в зварній двотавровій балці" з дисципліни "Розрахунок зварних конструкцій" для студентів напрямку 6.050504 "Зварювання" усіх форм навчання / Укл. М.Ю. Осіпов. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 14 с.

Укладач:

Осіпов М.Ю., доцент, канд. техн. наук.

Рецензент:

Капустян О.Є., ст. викладач

Відповідальний за випуск:

Осіпов М.Ю., доцент, канд. техн. наук.

Розглянуто

На засіданні НМК кафедри ОТЗВ

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ

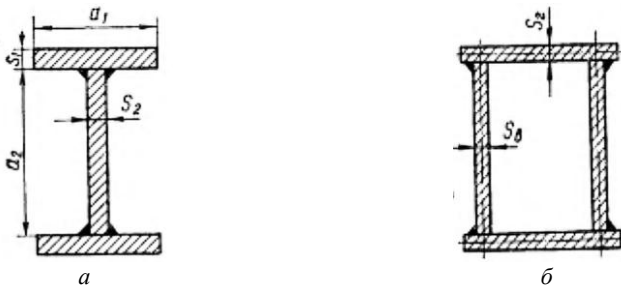
Протокол №2
від 29.10.2015 р.

1 МЕТА РОБОТИ

Дослідження розподілення нормальних та дотичних напружень в зварної 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, мостах, естакадах, у складі рам вагонів, кранів, станин та інших металевих конструкцій і машин. Найбільш часто використовують зварювальні балки двотаврового (рис. 2, *а*) та коробчастого перерізу (рис. 2, *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.

Зварювальні балки виготовляються з висотою стінки до декілька метрів. Для виготовлення стінок і поясів балок, залежно від умов експлуатації, може застосовуватися як маловуглецеві, так і низьколеговані сталі, а в особливих випадках для виготовлення балок використовуються алюмінієві і титанові сплави.

При проектуванні балки проводять розрахунки на жорсткість і міцність, а також виконують перевірки на загальну стійкість балки 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 методами широко застосовуються і **експериментальні методи** визначення деформацій і напруг конструкцій.

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

Конструктивно тензорезистор складається з паперовою або плівковою підкладки, на якій за допомогою клею укріплений чутливий елемент – спеціальний константановий тензометричний дріт діаметром 0,012...0,5 мм. Коефіцієнт тензометричної чутливості константанового 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 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 (або кгс/см²);

ε – відносна деформація, виміряна тензорезистором;

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

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

3 ПРИЛАДИ І ОБЛАДНАННЯ

- 3.1 Модель зварної балки з наклеєними тензорезисторами.
- 3.2 Стенд для випробування.
- 3.3 Комплект цифрової тензометричної апаратури ЦТК-1.

4 МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

В якості об'єкта дослідження прийнята модель зварювальної балки двотаврового профілю, виготовленої зі сталі Ст.3.

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. 4.1).

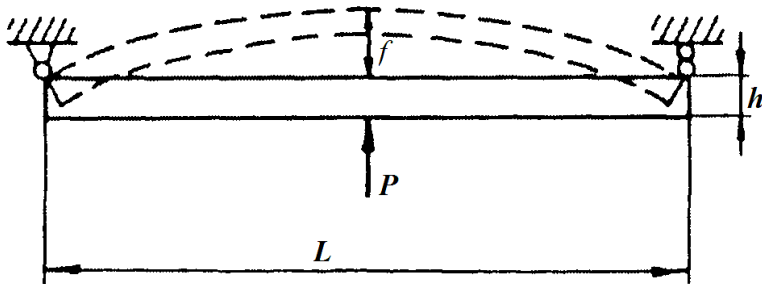


Рисунок 4.1 – Схема прикладення навантаження на двотаврову балку

Дослідження розподілення напружень в балці виконаємо розрахунковим та експериментальним шляхом.

4.1 Визначення деформацій та напружень в балці розрахунковим методом

При проектуванні зварювальних 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 (див. рис. 4.1) має вигляд:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma]_p, \quad (4.1)$$

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:

$$\sigma = \frac{M}{J_x} \cdot \frac{h}{2}, \quad (4.2)$$

де J_x – момент інерції перерізу відносно осі x , м⁴ (см⁴);

h – висота балки, м (см).

При цьому мають місце дві зони (рис. 4.2). На ділянці завширшки $\left(-\frac{h}{2}\right)$ – напруження стиску, а на ділянці $\left(+\frac{h}{2}\right)$ – напруження розтягу. Характер розподілення нормальних напружень по висоті балки від згину представлено епюрою на рис. 4.2.

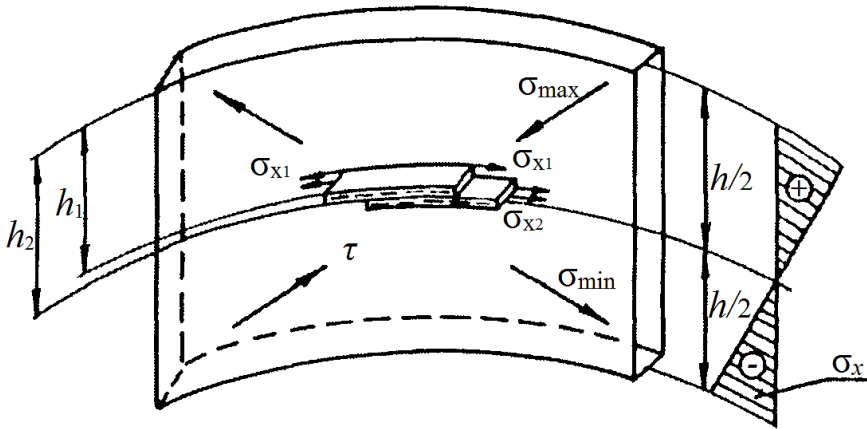


Рисунок 4.2 – Розподіл нормальних напруг по висоті балки

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} (див. рис. 4.2).

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:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{J_x \cdot \delta_{ст}}, \quad (4.3)$$

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

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

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

Характер розподілення дотичних напружень в стінці двотаврової балки показан на рис. 4.3, з якого видно, що дотичні напруження максимальної величини виникають в перерізі, розташованому на нейтральній вісі.

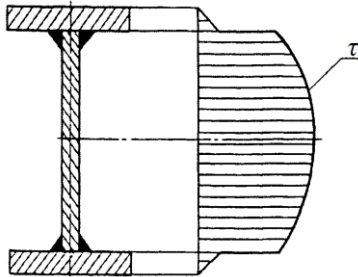


Рисунок 4.3 – Розподіл (епюра) дотичних напружень τ по висоті балки

Напруження σ_{max} та σ_{min} визначаються по відомим формулам теорії пружності:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (4.4)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (4.5)$$

де σ_{max} та σ_{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:

$$\sigma_x = \frac{M}{J_x} \cdot \frac{h_i}{2}, \quad (4.6)$$

де h_i відстань до досліджуваного шару в перетині балки, м.
Таким чином для зварювальної двотаврової балки:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (4.7)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (4.8)$$

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 по формулі:

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{L^3 P}{E J_x}, \quad (4.9)$$

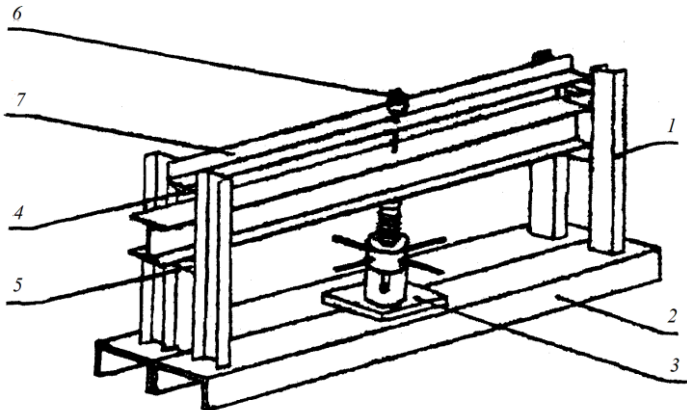
де L – довжина балки між опорами, м;

E – модуль пружності матеріалу, МПа;

J_x – момент інерції перерізу відносно осі x , м⁴.

4.2 Визначення деформацій та напружень в балці експериментальним методом

Навантаження балки виконується на спеціальному стенді (рис. 4.4), 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.



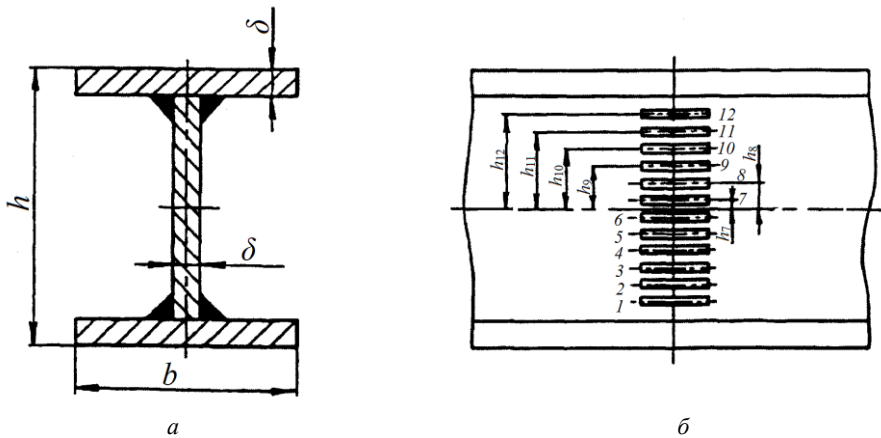
1 – стояк, 2 – основа, 3 – гвинтовий прес, 4 – призма, 5 – з'єднувальна планка,
6 – індикатор годинникового типу, 7 – штанга

Рисунок 4.4 – 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. 4.5.



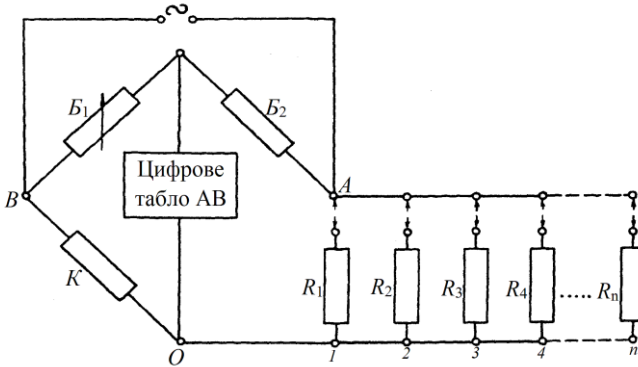
a – переріз балки, *б* – 1...12 – номери тензорезисторів (перерізів)

Рисунок 4.5 – Випробувана балка

При вимірюванні деформацій дрововими тензорезисторами важливо уникнути помилки вимірювання за рахунок зміння температури деталі. Зміння температури елемента викликає зміння, по-перше, питомого опору матеріалу тензорезистора; по-друге, зміння довжини дроту тензорезистора; по-третє, зміння лінійних розмірів об'єкту іспиту. Вплив цих явищ необхідно виключити.

Одним із розповсюджених методів компенсації впливу зміння температури є застосування двох однакових тензорезисторів, з котрих один наклеєн на модель балки (R_1, R_2, \dots, R_n), а другий (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. 4.6) та цим автоматично компенсуються температурні явища.

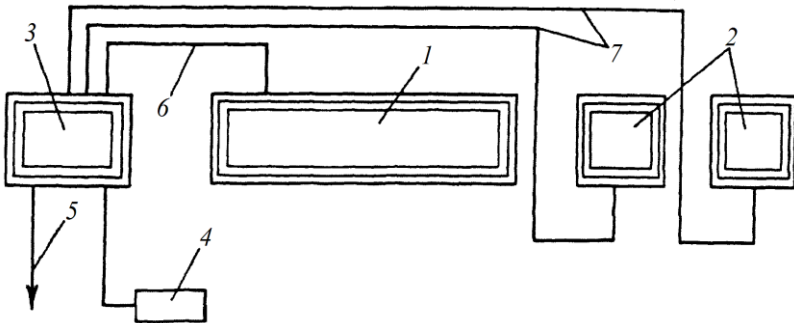


B_1, B_2 – баластні тензорезистори; R_1, R_2, \dots, R_n – робочі тензорезистори;
 K – компенсаційний тензорезистор

Рисунок 4.6 – Схема вимірювання напруг в перерізах балки

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

Блок-схема приладу ЦТК-1 приведена на рис. 4.7.



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 4.7 – Блок-схема приладу ЦТК-1

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).

У вимірювальному приборі ЦТК-1 компенсаційний (К) та робочі тензорезистори складають зовнішній напівміст, а баластні (B_1 і B_2) – внутрішній напівміст (див. рис. 4.6). Послідовне перемикання робочих тензорезисторів ($R_1, R_2, \dots R_n$) здійснюється при натисканні кнопки перемикача (АП) електронного вимірювача деформацій АВ.

При підготовці комплекту апаратури ЦТК-1 до роботи, ціна ділення приладу АВ приведена у відповідності з тензометричною чутливістю ($K = 2$) 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

$$\varepsilon = N_2 \cdot 10^{-5} - N_1 \cdot 10^{-5}. \quad (4.10)$$

Напруження визначається по формулі:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (4.11)$$

5 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Перед усім, 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.

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

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

5.1.2 По формулі (4.9) визначити навантаження P , при якому балка отримує прогин $f = 1$ мм.

5.1.3 Визначити по формулі (4.6) 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. 4.5, б).

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

5.1.5 По формулі (4.3) визначити величину максимальних дотичних напружень.

5.1.6 По формулам (4.7) та (4.8) визначити напруження σ_{max} та σ_{min} . Отримані в результаті розрахунку дані, занести у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку напружень у перерізах балки

Номера перерізів у яких визначались напруження (рис.4.5)	Напруження, МПа			
	σ_{σ_x}	σ_{max}	σ_{min}	τ_{xy}
1				
2				
3				
·				
·				
12				

5.2 Визначення деформації та напружень електротензометричним методом.

5.2.1 Вивчити методику вимірювання деформацій за допомогою тензорезисторів.

5.2.2 Ознайомитися зі стендом для іспиту балки.

5.2.3 Зняти початкові показання електронного вимірювача деформацій (АВ) до навантаження балки за усіх тензорезисторів й отримані дані (N_1) занести в табл. 5.2.

5.2.4 Виконати навантаження балки, забезпечив їй прогин $f = 1$ мм, величина котрого фіксується за допомогою індикатора (рис. 4.4).

5.2.5 Зняти повторні показання приладу АВ з усіх тензорезисторів при навантаженій балці та результати N_2 занести в табл. 5.2.

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

5.2.6 Визначити деформацію ε та напруження σ (див. розд. 4.2) та отримані результати занести у табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Результати експериментального визначення деформації та напружень у перерізах балки

Номер тензорезистора (перерізу балки)	$N_1 \cdot 10^{-5}$	$N_2 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	σ , МПа
1				
2				
3				
.				
.				
12				

6 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт по даній роботі оформлюється та представляється кожним студентом у письмовому вигляді.

У звіті необхідно відобразити:

- 6.1 Титульний лист з підписом виконавця.
- 6.2 Вступ.
- 6.3 Мета роботи.
- 6.4 Прибори та обладнання.
- 6.5 Схему навантаження.
- 6.6 Розрахунок деформації та напружень.
- 6.7 Схему підключення тензорезисторів.
- 6.8 Результати аналітичного та експериментального дослідження деформацій та напружень у вигляді табл. 5.1 і 5.2.
- 6.9 Графіки розподілення напружень по перерізу балки, отриманих розрахунковим та дослідним методами.
- 6.10 Аналіз отриманих результатів.
- 6.11 Висновки.

7 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

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

7.2 Як визначаються нормальні напруження в балках?

7.3 Як визначаються дотичні напруження в балках?

7.4 Як визначається прогин балки?

7.5 Яке улаштування тензорезистора?

7.6 Яким чином при вимірюванні деформацій дротовими тензорезисторами компенсуються температурні явища?

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

8 ВКАЗІВКИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

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

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

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

8.4 У випадку виникнення пожежі або поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці та пожежної безпеки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для вузов / Г.А. Николаев, В.А. Винокуров. – М.: Высш. шк., 1990. – 446 с.

2. Серенко А.Н. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи: Учебное пособие / А.Н. Серенко, М.Н. Крумбольдт, К.В. Багрянский. – К.: Высшая школа, 1977. – 336 с.

3. Логинов В.И. Электрические измерения механических величин / В.И. Логинов. – М.: Энергия, 1976. – 103 с.