

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до лабораторної роботи «Дослідження поверхневого
напруженого стану деталей газотурбінних двигунів»

для студентів зі спеціальності
131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології машинобудування»
усіх форм навчання

Запоріжжя 2024

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження поверхневого напруженого стану деталей газотурбінних двигунів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Д.В. Павленко, Г.В. Пухальська, – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024 – 25 с.

Укладачі: Павленко Д.В., д.т.н., проф. каф.ТАД
Пухальська Г.В., к.т.н, доц. каф. ТМБ

Рецензент: Козлова О.Б., к.т.н., доц. каф. ТМБ

Відповідальний за випуск Дядя С.І., к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено на засіданні кафедри
«Технологія машинобудування»
Протокол № 1
від 06. 08. 2024 р.

Рекомендовано до видання
НМК МФ
Протокол № 1 від 27.08.2024 р.

1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомиться з видами залишкових напружень та методами їх визначення.
2. Вивчити методику визначення залишкового напруженого стану поверхневих шарів матеріалу ГТД методом послідовного видалення шарів металу електричним поліруванням.
3. Вивчити теоретичні основи обробки кривих деформації зразка і методику розрахунку залишкових напружень на ЕОМ.
4. Для заданої кривої деформації побудувати графік розподілу залишкових напружень за товщиною зразка.
5. Оцінити параметри напруженого стану поверхневого шару матеріалу.

2. ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ

1. Прилад для визначення залишкових напружень ПОН–2.
2. Терези аналітичні типа АДВ–200.
3. Пристрій для закріплення зразків.
4. Прилад для автоматичного запису прогину зразка.
5. Експериментальні зразки.
6. Програма для розрахунку залишкових напружень OSN (Приклад програми наведений у додатку А).

3. ЗМІСТ РОБОТИ

1. Ознайомитися з теоретичною частиною роботи.
2. Підготувати вихідні дані для розрахунку залишкових напружень першого роду.
3. Побудувати графік розподілу залишкових напружень у поверхневому шару деталі.
4. Провести розрахунок напружень за допомогою програми OSN.
5. Зробити висновок про характер залишкового напруженого стану поверхні деталі.

4. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Залишкові напруження – це напруження, що існують у матеріалі деталі без зовнішнього навантаження.

В залежності від протяжності вони розрізняються на:

- напруження першого роду – врівноважуються в об'ємах, сумісних з розмірами деталі;
- напруження другого роду – врівноважуються в об'ємах, сумісних із розмірами зерен кристалів;
- напруження третього роду – врівноважуються в межі міжатомних відстаней;
- стиску (-) – якщо матеріал відчуває деформацію стиску;
- розтягу (+) – якщо матеріал відчуває деформацію розтягу.

В залежності від походження напруження розрізняють на:

- конструкторські залишкові напруження (з'являються під час складання або експлуатації);
- технологічні залишкові напруження (з'являються в наслідок неоднорідних об'ємних змін у поверхневому шарі під час виготовлення деталей).

В залежності від чинників виникнення розрізняють напруження:

- ливарні;
- термічні;
- зварювальні;
- напруження від механічної обробки.

На точність деталей при механічній обробці та втомлену міцність найбільший вплив мають напруження першого роду. Залишкові напруження розтягу знижують точність обробки і межувитривалості деталей, стискуючі напруження – підвищують.

Знак залишкових напружень і характер їх розподілу залежить від виду механічної і термічної обробки, якої піддавалася деталь.

Механізм формування технологічних залишкових напружень у поверхневому шарі

Формування технологічних залишкових напружень відбувається при одночасній дії двох чинників: силового і теплового. При дії цих чинників відбувається деформація поверхневого шару і підшару матеріалу.

Під дією силового чинника (рис.4.1) підшар матеріалу деформується пружно, в той час коли поверхневий шар матеріалу деформується пластично. Після зняття навантаження матеріал підшару намагається повернутися у вихідний стан, чому перешкоджає пластично деформований поверхневий шар. У цьому випадку у поверхневому шару матеріалу утворюються залишкові напруження стиску.

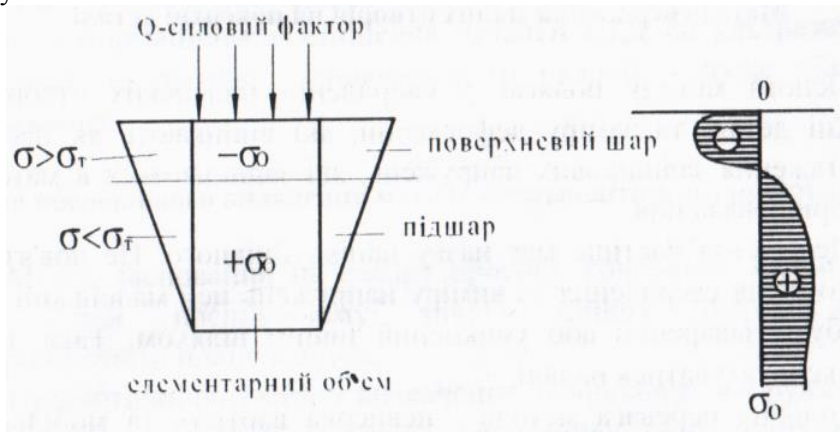


Рисунок 4.1 – Формування в поверхневому шарі залишкових напружень стиску під дією силового чинника

При дії теплового чинника підшар матеріалу деформується пластично, у наслідок чого після зняття навантаження в поверхневому шару матеріалу утворюються залишкові напруження розтягу.

Під час механічної обробки, як правило, обидва чинники діють одночасно. Остаточний залишковий напружений стан поверхні деталі залежить від ступеня перевантаження силового чинника над тепловим та навпаки.

Метод рентгеноструктурного аналізу

Метод полягає в знаходженні різниці між атомами кристалевої решітки матеріалу до наведення залишкових напружень та після. Порівнюючи ці величини можна судити про величини та знак залишкових напружень. Для знаходження міжатомних відстаней використовуються три метода:

- кіноплівка;
- дифрактометр;
- спеціальні чутливі елементи.

Найбільш поширеним є метод побудови дифракційних піків за допомогою дифрактометра.

Цей метод визначення залишкових напружень має як недоліки так і переваги. По-перше він є одним із найточніших методів, який дозволяю вимірювати напруження в локальному місті. Однак цей метод є одночасно і найдорожчим, так як вартість обладнання для його використання дуже велика. Це обладнання має дуже велику ціну, що заперечую його використання в польових умовах.

Метод свердлення малих отворів на поверхні деталі

Основа методу полягаю у свердленні маленьких отворів на поверхні деталі та заміру деформацій, які виникають як наслідок розвантаження залишкових напружень, які залишаються в матеріалі для їх зрівноваження.

Цей метод частіше має назву напівруйнівного. Це пов'язано з тим, що після свердлення та виміру напружень цей маленький отвір може бути заварений або уникнений іншим шляхом. Така деталь може експлуатуватися надалі.

Головна перевага метода – невисока вартість та мобільність. Однак він має дуже незначну точність вимірювання та суттєві умови у використанні (може використовуватися тільки для деталей, де залишкові напруження рівномірно розподілені по перерізу).

Ультразвуковий метод

Полягає у вимірюванні швидкості, з якою ультразвукові хвилі розосереджуються в матеріалі в напруженому та ненапруженому стані. Метод має дуже високу мобільність, відносно недорогий та може застосовуватися в польових умовах. Однак він не знайшов широкого поширення у зв'язку з дуже низькою точністю вимірювання напружень, та нездатністю їх вимірювання на різних глибинах від поверхні. Він перш за все використовується як попередній метод визначення залишкових напружень.

Метод нанесення ламких покриттів

Метод полягає в нанесенні ламких покриттів на поверхню деталі та свердленні невеличких отворів. При цьому виникають деформації, які намагаються зрівноважити напруження в деталі. На поверхні деталі стають помітними тріщини покриття, які і уявляють собою поле розподілення залишкових напружень.

Цей метод використовується для кількісної оцінки напруженого стану деталей.

Метод стрічок Альмана

Цей метод схожий з методом послідовного зняття шарів матеріалу, але відрізняється від нього тим, що зразки вирізаються до наведення залишкових напружень. Він використовується для оцінки ступені деформаційного зміцнення деталей ГТД на ультразвукових установках та дротом. Основний його недолік – дуже обмежене застосування.

Метод послідовного видалення металу електролітичним поліруванням

Метод заснований на виміру прогину консольно закріпленого зразка, при послідовному знятті тонких шарів металу електролітичним поліруванням.

Це найточніший метод визначення залишкових напружень. Він часто використовується як зразок при порівнюванні інших методів виміру. За його допомогою можна отримати картину розподілу напружень у глибині матеріалу. Однак він потребує вирізки зразків з натурних деталей, що може призвести до суттєвого перерозподілу напружень, а також потребує багато часу.

При використанні цього метода застосовується звичайна теорія стержнів, заснована на гіпотезі плоских перетинів. Залишковий напружений стан рахується одноосьовим.

Прогин виникає як наслідок порушення рівноваги внутрішніх напружень у зразку, через видалення поверхневих шарів матеріалу, тобто порушення рівностей (4.1) і (4.2).

$$\sum \sigma_0 = 0 \quad (4.1)$$

$$\sum F_0 = 0 \quad (4.2)$$

Розрахунок залишкових напружень проводиться за формулою:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \text{ МПа} \quad (4.3)$$

де σ_1 – напруження від вирізки зразка;
 σ_2 – напруження від зняття поточного шару;
 σ_3 – напруження від зняття попередніх шарів.

Напруження σ_1 у практичних розрахунках не враховується.

Значення σ_2 може бути визначене за формулою (4.4):

$$\sigma_2 = \frac{E \cdot (h - \Delta)^2}{3 \cdot Lt^2} \cdot \frac{df}{da}, \text{ МПа} \quad (4.4)$$

де $E = 2 \cdot 10^4$ МПа – модуль пружності першого роду,
 h – висота зразка, мм;
 a – товщина усіх віддалених шарів, мм;
 Lt – довжина поліруємої частини зразка, мм;

$\frac{df}{da}$ - значення похідної функції прогину зразка на глибині a .

Значення σ_3 визначається за формулою (4.5)

$$\sigma_3 = \frac{E}{3 \cdot Lt} \cdot \left[4 \cdot (h - \Delta) \cdot f(a) - 2 \cdot \int_0^{\Delta} f(\zeta) d(\zeta) \right], \text{МПа} \quad (4.5)$$

де $f(\zeta)$ - функція прогину зразка, мм.

Дослідження проводиться за допомогою приладу ПОН – 2 із записом прогину зразка за допомогою самописа.

Геометрія зразків для визначення залишкових напружень методом послідовного зняття поверхневих шарів матеріалу приведена на рис. 2.

Розміри зразка повинні знаходитись у пропорційній залежності 10:1:0,3. Схема приладу ПОН – 4.2 приведена на рис. 4.3. Схема закріплення зразка та виміру його деформації наведена на рис. 4.4.

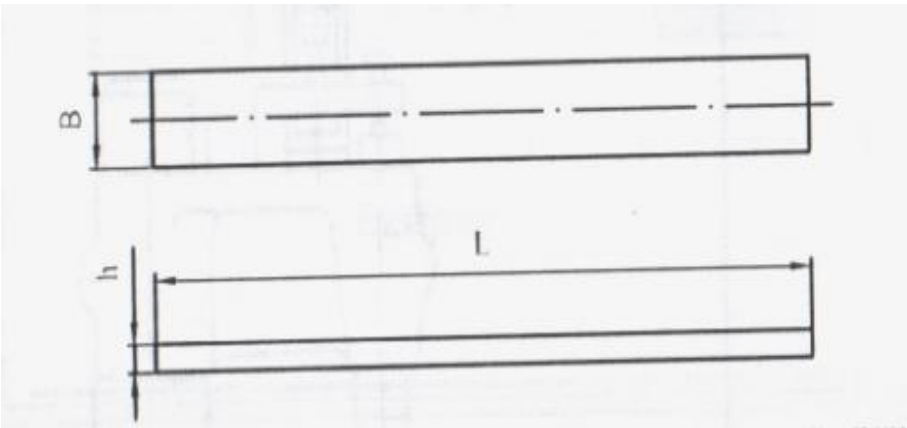


Рисунок 4.2 – Зразок для дослідження залишкових напружень першого роду методом послідовного зняття тонких шарів метала

Глибина знятого шару визначається часом електрополірування та величиною сили струму. Товщина знятого шару визначається за формулою (4.6):

$$\Delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot \rho}{B \cdot Lt}, \text{мм}; \quad (4.6)$$

де Q_1, Q_2 – маса зразка до і після електрополірування, г;
 ρ – щільність матеріалу, г/мм³;
 B – ширина зразка, мм;
 Lt – довжина частини зразка, що полірується.

Маса зразка до і після електрополірування визначається за допомогою аналітичних терезів типа АДВ – 200 із точністю 0,001г.

Для захисту поверхні зразків що не піддається електрополіруванню вони покриваються захисним лаком.

Величина прогину зразка за допомогою мехатрона перетворюється у електричний сигнал, що записується на діаграмній стрічці самописа.

Приклад діаграмної стрічки з записаною кривою прогину зразка наведений на рис. 4.5.

Вісь У являє собою прогин консольної частини зразка, вісь Х – час процесу електрополірування. Коефіцієнти збільшення:
за віссю У – 3000 діаграмних клітин/мкм;
за віссю Х – 96 діаграмних клітин/час.

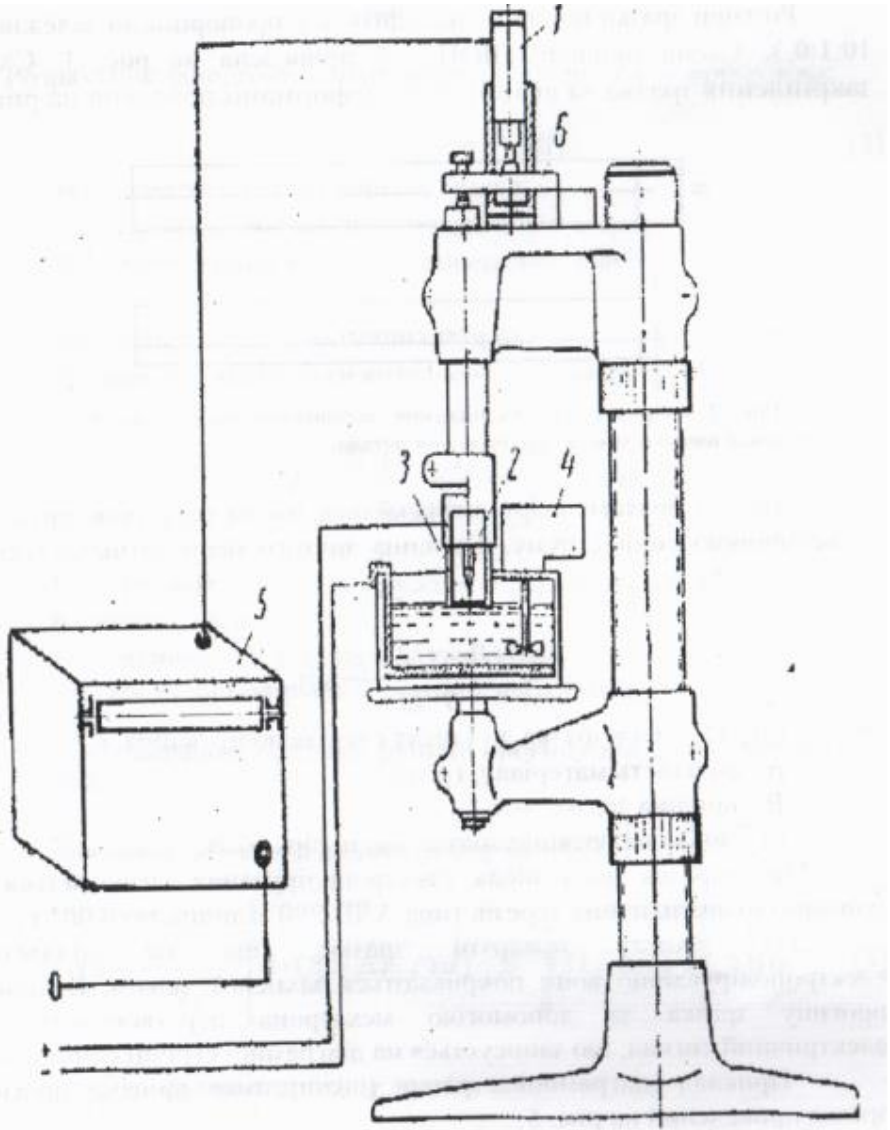


Рисунок 4.3 – Схема приладу ПИОН – 2

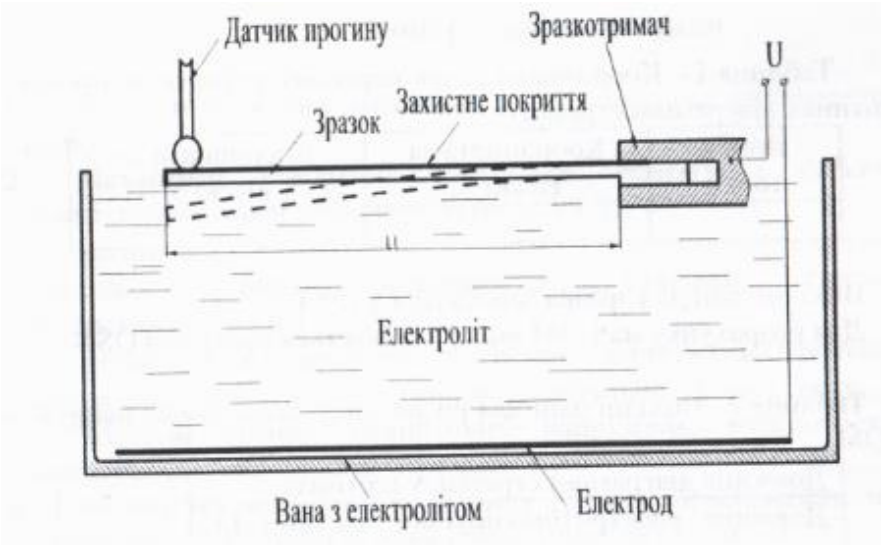


Рисунок 4.4 – Схема закріплення та виміру деформації зразка

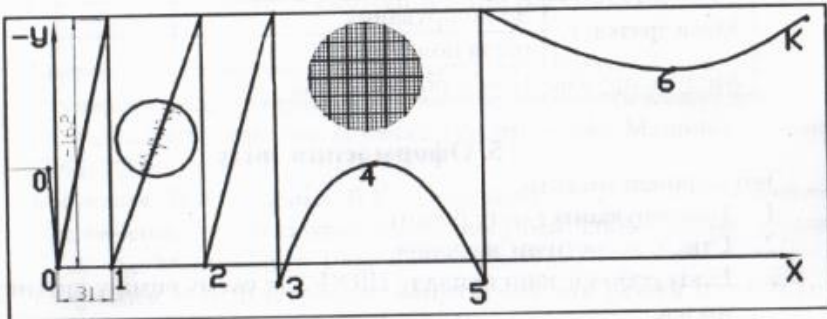


Рисунок 4.5 – Крива деформації зразка

Варіанти завдань приведені у додатку Б.

Для визначення залишкових напружень необхідно підготувати вихідні данні для ЕОМ:

1. Задати на кривій прогину точку "0" (точка 0 на рис. 4.5).

Звичайно "0" вибирається на відстані 2 – 3 клітини від початку кривої (точка 01 на рис. 4.5).

2. Визначити точки перегину кривої прогину і точки перетинання кривої з віссю X. Відмітити їх точками 1, 2 тощо.

3. Закоординувати відзначені точки. Дані занести і табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Координати точок перегину деформації прогину (у клітинах діаграмної стрічки)

Номер точки	Координата за віссю X	Координата за віссю Y

Вихідні дані для зразка заносяться у табл. 4.2.

Для розрахунку на ЕОМ.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку залишкових напружень на ЕОМ

Довжина діаграмної стрічки, у клітинах		
Довжина електрополіруємої частини l_t , мм		
Висота зразка h , мм		
Маса зразка, г.	до полірування	
	після полірування	
Модуль пружності матеріалу E , МПа		

5. ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт повинен містити :

1. Найменування і мету роботи.
2. Стислі теоретичні зведення.
3. Ескіз робочої зони приладу ПОН – 2 та схему виміру прогину зразка.
4. Таблицю координат опорних точок кривої прогину.
5. Таблицю вихідних даних для розрахунку напружень за допомогою ЕОМ.
6. Графік розподілу залишкових напруг за перетином зразка.
7. Роздруківку результатів роботи.
8. Висновки.

У висновках необхідно зазначити знак напружень на поверхні зразка, глибину їх розповсюдження, метод обробки зразка, а також провести порівняння визначених залишкових напружень з межею текучості та тривкості матеріалу.

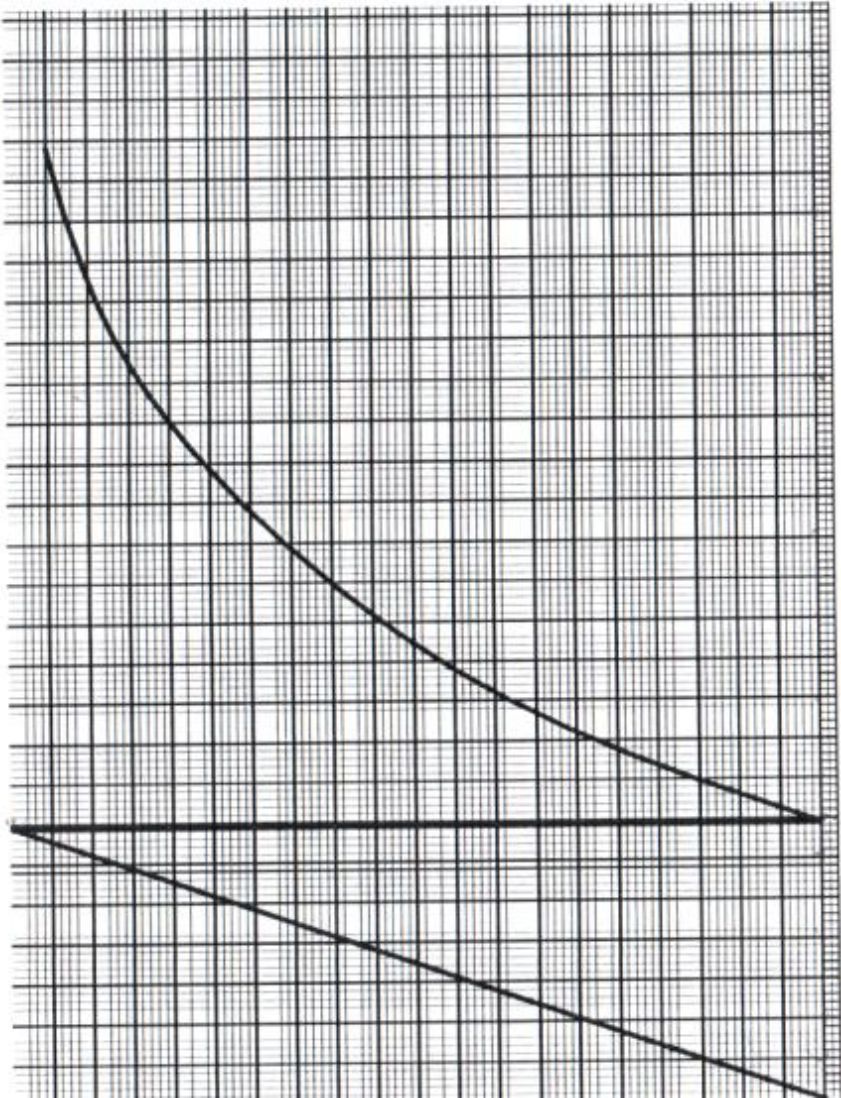
6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

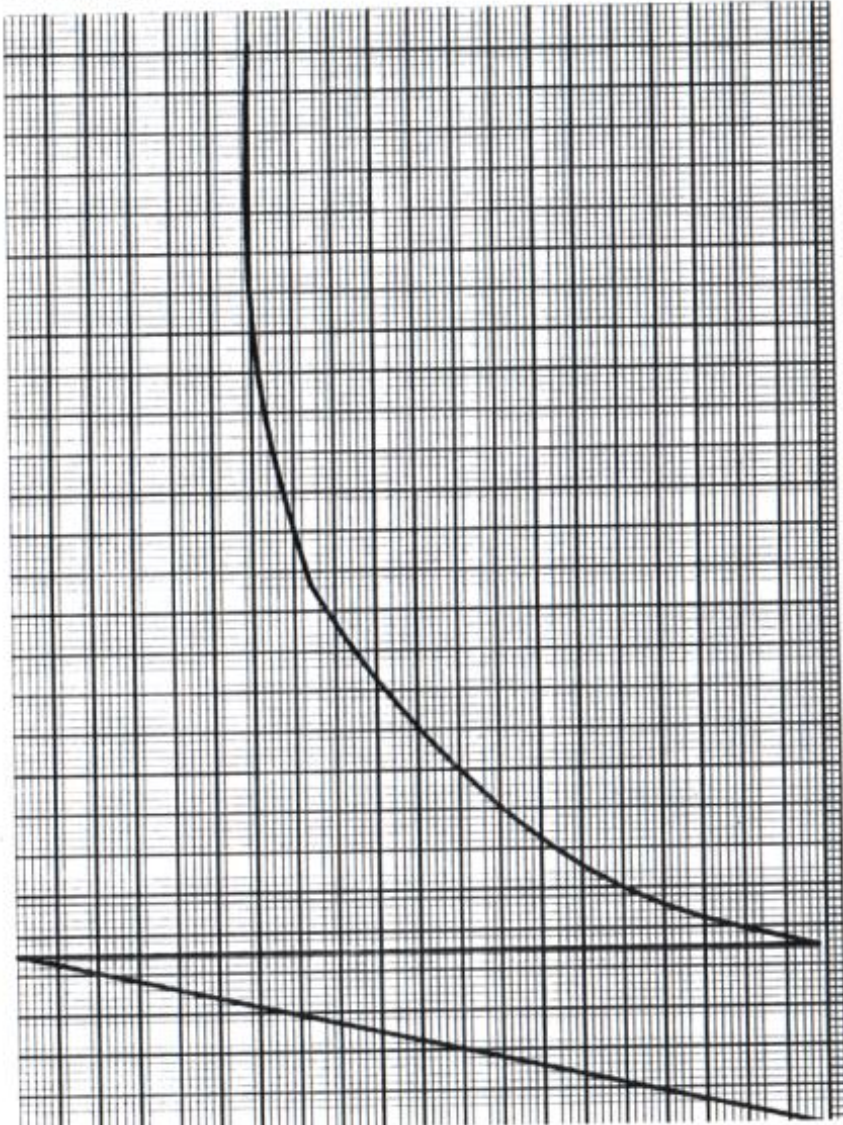
1. Види залишкових напружень, чинники, що викликають їх появу.
2. Механізми утворення напружень розтягу і стиску у поверхневому шарі матеріалу деталей ГТД.
3. Вплив напруженого стану деталей ГТД на їх основні механічні властивості (межу витривалості, статичну тривкість, зносостійкість тощо).
4. Технологічні прийоми усунення напружень, розтягу і наведення у поверхневому шарі матеріалу напружень стиску.
5. Методи виміру залишкових напружень, можливості їх застосування, недоліки та переваги.
6. Метод послідовного видалення тонких поверхневих шарів матеріалу – теоретичні основи і практичне застосування.

7. ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

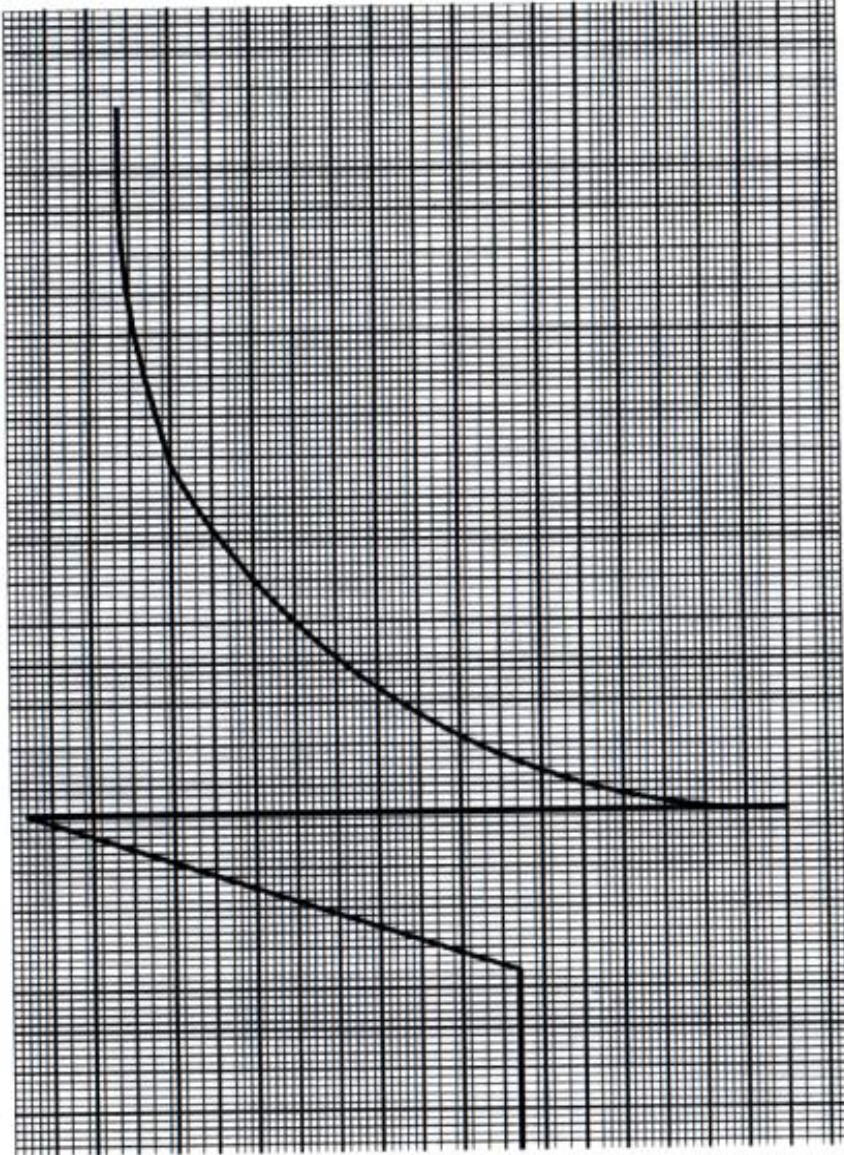
1. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
2. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016 – 238 с.
3. Гнучкі виробничі системи: навчальний посібник для студентів напрямку 131 Прикладна механіка – 2-е вид. перероблене та доповнене /І.Е.Яковенко, О.А. Пермяков, О.М. Шелковой – Харків: «Діса плюс», 2021. – 284 с.

$L_1=43\text{MM}$
 $H=1.6\text{MM}$
 $Q_1=8.952\text{T.}$
 $Q_2=6.69\text{T.}$
 $E=2\cdot 10^5\text{MPa}$

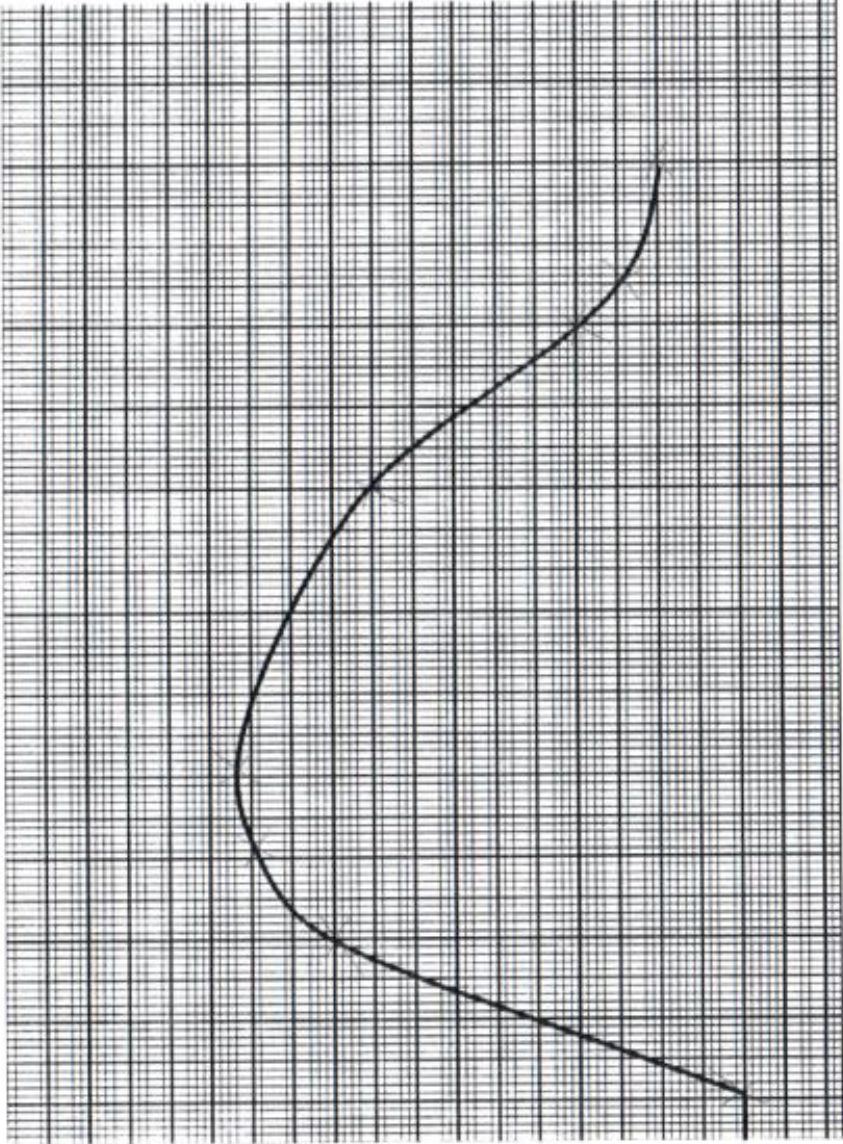


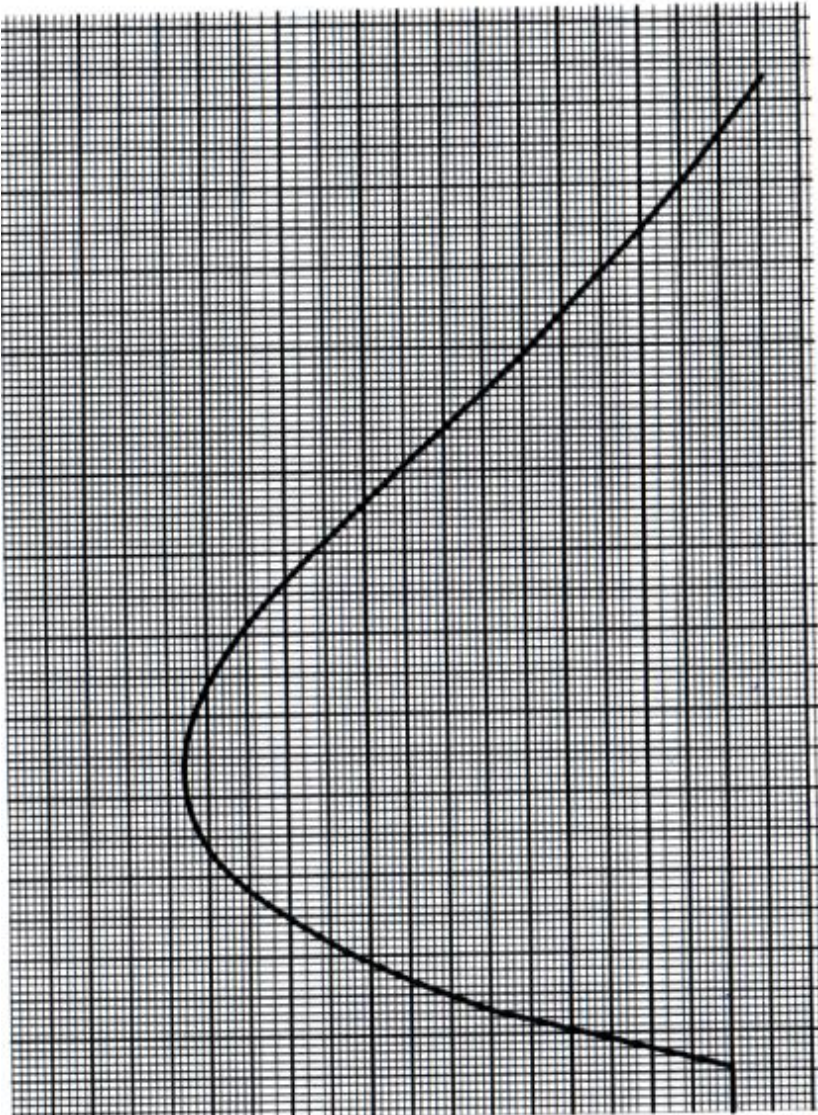
$L_t = 47 \text{ MM}$ $H = 1.7 \text{ MM}$ $Q_1 = 7.325 \text{ r.}$ $Q_2 = 7.042 \text{ r.}$ $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ 

$L_1=4\text{MM}$
 $H=1.8\text{MM}$
 $Q_1=6.895\text{r.}$
 $Q_2=6.612\text{r.}$
 $E=2\cdot 10^5\text{MPa}$

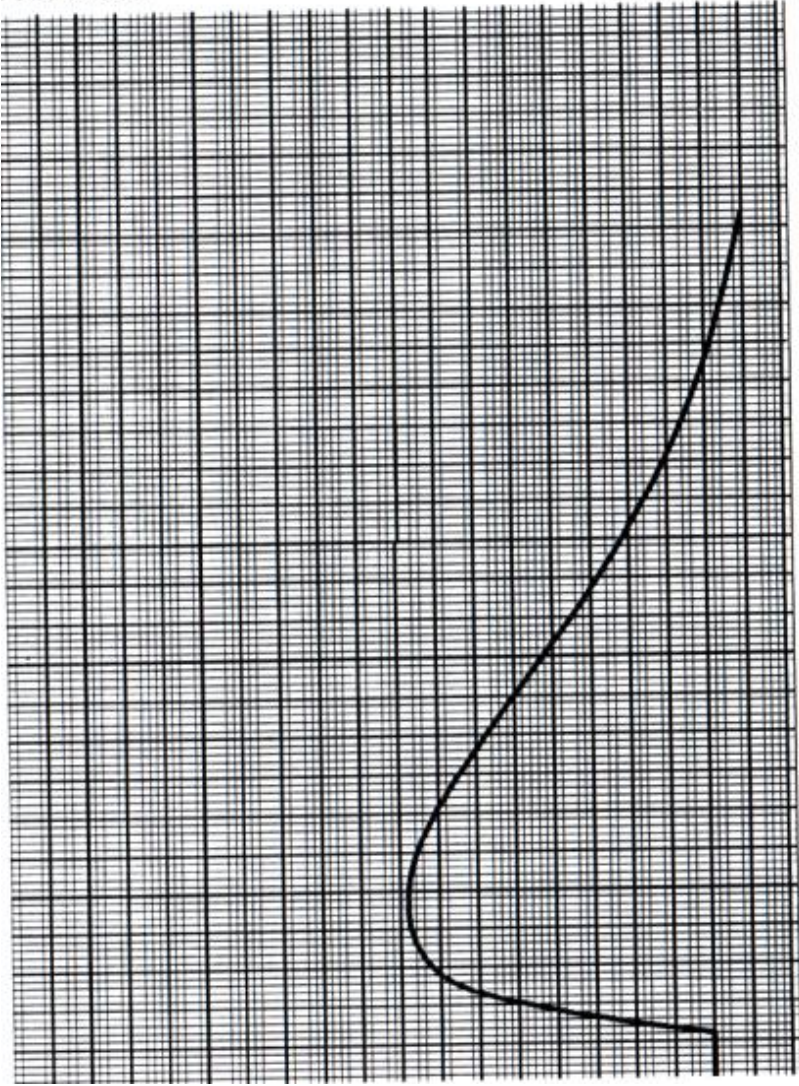


$L_1=45\text{MM}$
 $H=1.9\text{MM}$
 $Q_1=7.246\Gamma.$
 $Q_2=6.963\Gamma.$
 $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$

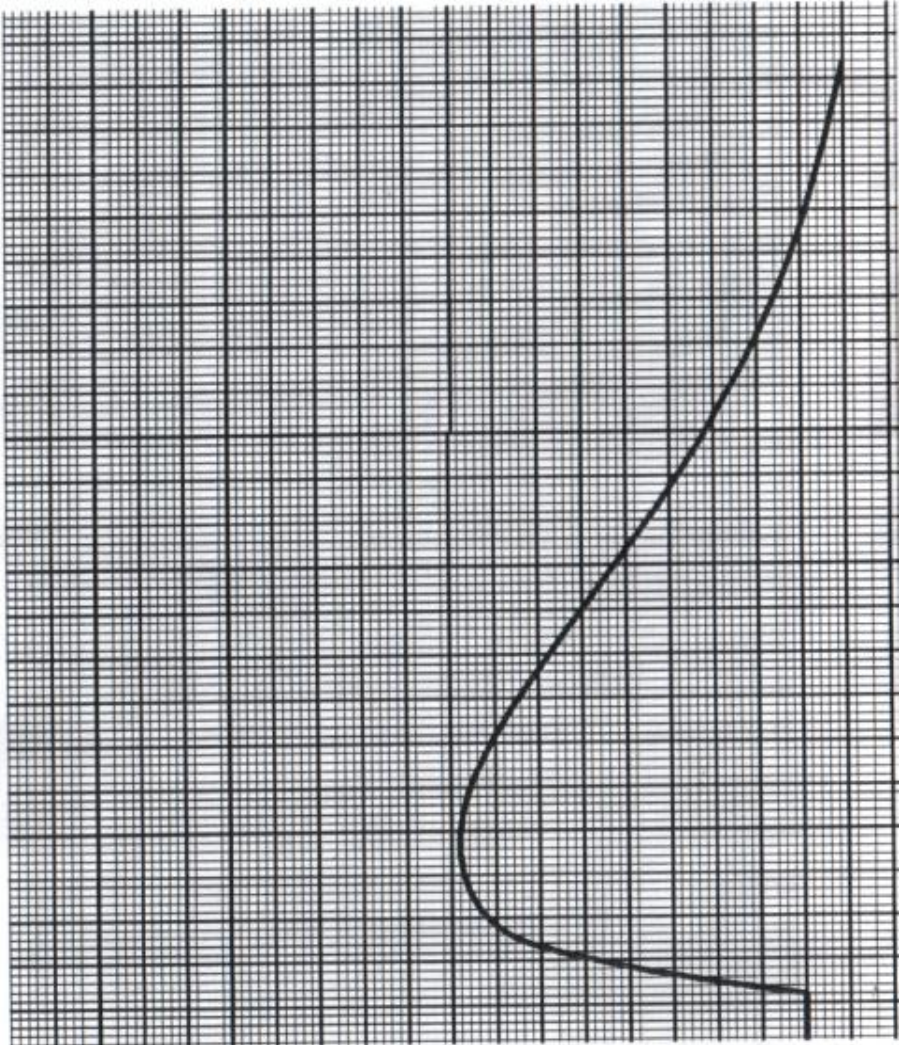


$L_1=43\text{MM}$ $H=1.6\text{MM}$ $Q_1=7.125\text{Г.}$ $Q_2=6.842\text{Г.}$ $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$ 

$L_1=43\text{MM}$
 $H=1.8\text{MM}$
 $Q_1=7.515\text{r.}$
 $Q_2=7.232\text{r.}$
 $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$



$L_1=46\text{MM}$
 $H=1.7\text{MM}$
 $Q_1=6.952\text{T}$
 $Q_2=6.669\text{T}$
 $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$



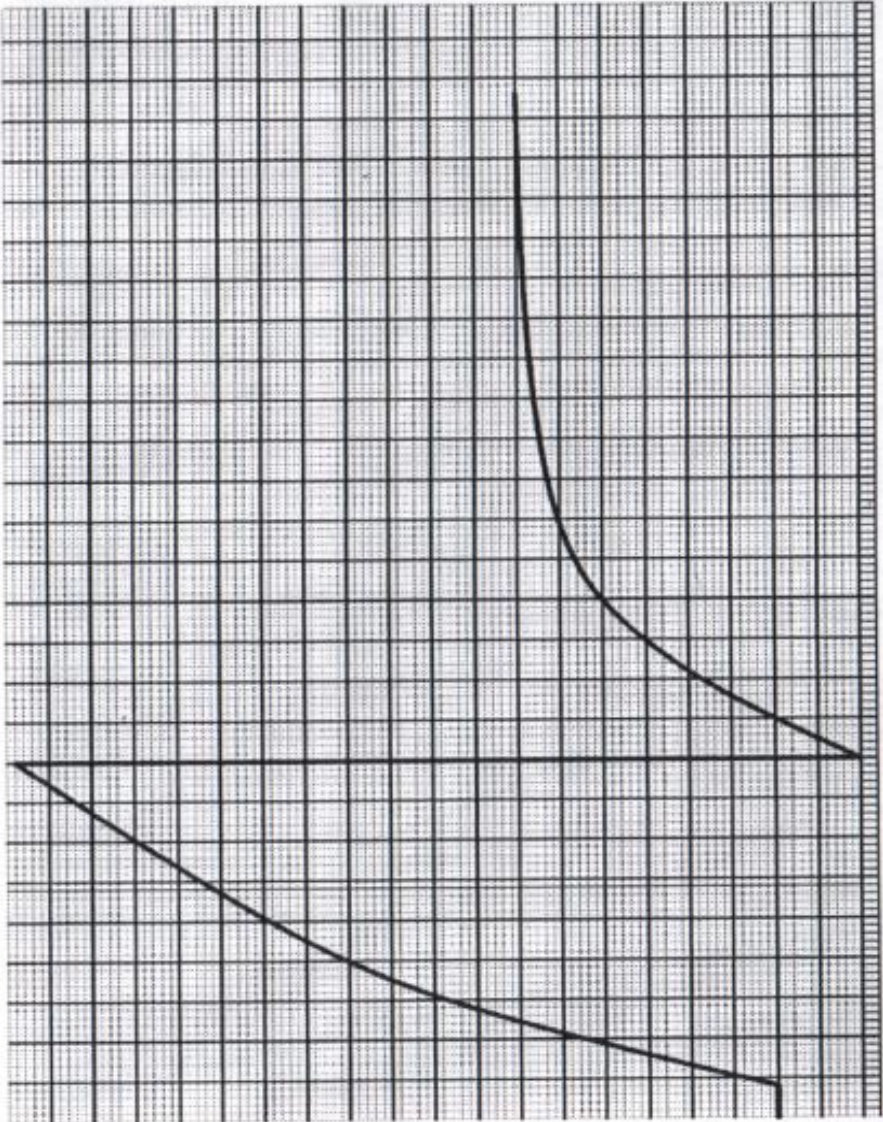
$$L_1 = 45 \text{ MM}$$

$$H = 1.9 \text{ MM}$$

$$Q_1 = 7.655 \text{ Г.}$$

$$Q_2 = 7.372 \text{ Г.}$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$



$L_1 = 37 \text{ mm}$
 $H = 2.2 \text{ mm}$
 $Q_1 = 7.478 \text{ r.}$
 $Q_2 = 7.211 \text{ r.}$
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

