

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Запорізький національний технічний університет**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

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

(з напрямку підготовки 6.050502 „Інженерна механіка”(спеціальність  
„Технології машинобудування”)  
для усіх форм навчання

Запоріжжя  
2015

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження поверхневого напруженого стану деталей газотурбінних двигунів» з напряму підготовки 6.050502 «Інженерна механіка» (спеціальність „Технології машинобудування”) для усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська, Д.В. Павленко. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. - 30 с.

Укладачі:

Пухальська Г.В., к.т.н., доц.  
Павленко Д.В., к.т.н., доц.

Рецензент:

Дядя С.І., к.т.н., доц.

Відповідальний за  
випуск

Внуков Ю.М., д.т.н., проф.

Затверджено на засіданні  
кафедри "Технологія  
машинобудування"  
Протокол № 5 від "08"  
грудня 2015 р.

## 1. МЕТА РОБОТИ

1. Ознайомитися 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 ПІОН–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 межу витривалості 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.

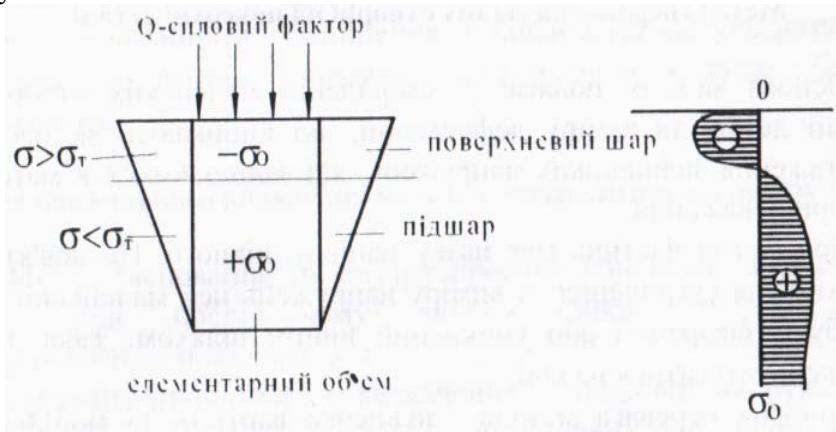


Рисунок 4.1 – Формування в поверхневому шарі залишкових напружень стиску під дією силового чинника

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 дозволяє 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 заперечує його використання в польових умовах.

## Метод свердлення малих отворів на поверхні деталі

Основа методу полягає 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  $\sigma_1$  – напруження від вирізки зразка;  
 $\sigma_2$  – напруження від зняття поточного шару;  
 $\sigma_3$  – напруження від зняття попередніх шарів.

Напруження  $\sigma_1$  у практичних розрахунках не враховується.

Значення  $\sigma_2$  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  $\sigma_3$  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.

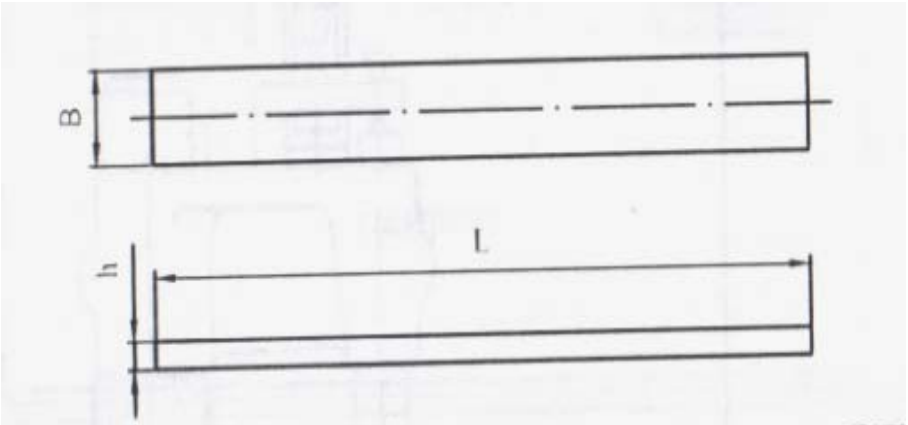


Рисунок 4.2 – Зразок для дослідження залишкових напружень першого роду методом послідовного зняття тонких шарів метала

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;  
 $\rho$  – щільність матеріалу, г/мм<sup>3</sup>;  
 $B$  – 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.

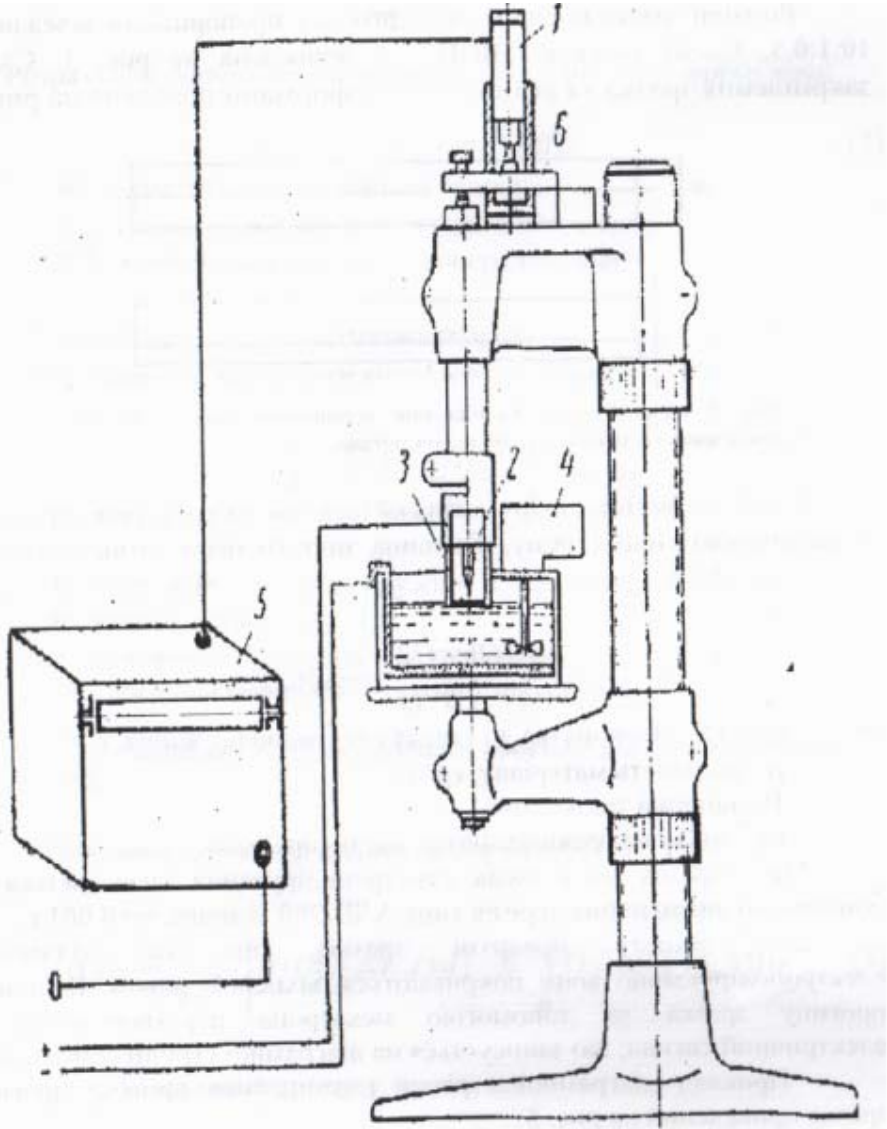


Рисунок 4.3 – Схема приладу ПОН – 2



Рисунок 4.4 – Схема закріплення та виміру деформації зразка

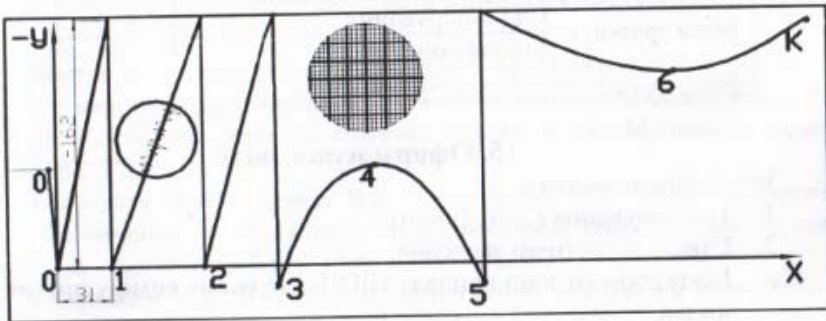


Рисунок 4.5 – Крива деформації зразка

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 використовується програма OSN.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку залишкових напружень на ЕОМ

Довжина діаграмної стрічки, у клітинах		
Довжина електрополіруємої частини $L_t$ , мм		
Висота зрвзка $h$ , 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 програми OSN.
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. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М: Машгиз., – 1963. – 245 с.
2. Рахмарова М. С., Мирер Я. Г. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1966. 222 с.
3. Богуслаев В. А., Яценко В. К., Притченко В. Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущих способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт. 1993. 331 с.
4. Кудрявцев И. В. Внутреннее напряжение как резерв прочности в машиностроении М.: Машгиз, 1951.
5. Сулиман А. С., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов М.: Машиностроение, - 240 с.
6. Трощенко В. Т. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных напряжениях. – К.: Наукова думка, 1981.
7. Трощенко В. Т. Циклические деформации и усталость металлов. – К.: Наукова думка, 1985.



**Додаток А**  
**Приклад розрахунку залишкового напруженого**  
**стану деталі за допомогою програми OSN.**

**Расчет остаточного напряженного**  
**состояния поверхностного слоя**  
**деталей ГТД**

**Исходные данные для образца №4**

**Геометрические**  
**параметры образца, мм**

Ширина образца	$B := 8,9$	Вес до полирования	$Q_1 := 7,7070$
Высота поперечного сечения образца, мм	$h := 1,875$	Вес после полирования	$Q_2 := 7,4240$
Длина стравливаемой части образца	$Lt := 44$	Модуль упругости, МПа	$E := 2 \cdot 10^4$
		Длина диаграммы (в клетках)	$Id := 233$

	X	Y	
	0	0	]
Таблица исх. данных (в клетках ленты самописца)	31	-162	
	53	-250	
	79	-284	
Первый столбец – X	125	-246	
Второй столбец – Y	169	-228	
	233	-258	

Определение глубины снятого слоя и времени электрополирования

$$\delta := \frac{Q_1 - Q_2}{B \cdot Lt \cdot 7,75} \cdot 10^6 \quad \delta = 93,249$$

$$t := \frac{Id}{96} \cdot 60 \quad Id = 145,625 \text{ мин}$$

Определение коэффициента скорости электрополирования

$$Ksped := \frac{\delta}{1,6 \cdot t} \cdot 10^{-3} \quad Ksped = 4,002 \cdot 10^{-4}$$

Число точек данных  $n := length(data^{(0)}) \quad n = 7$

Глубина снятого слоя

$$i := 0..n - 1 \quad a := data^{(0)} \cdot Ksped$$

Прогиб  $b := data^{(1)} \cdot 2,5 \quad f_i = \frac{b_i}{3000}$

Толщина слоя на

рассматриваемом этапе травления  $i := 1..n - 1 \quad \Delta_i = a_i - a_{i-1}$

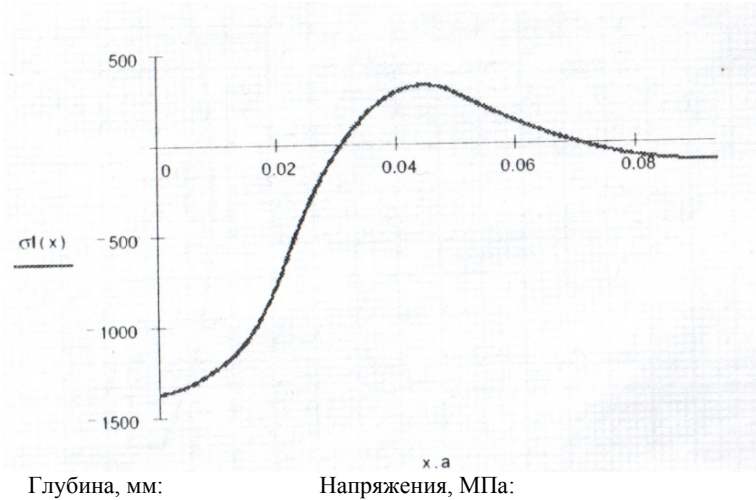
Аппроксимация ф-ии  $f(\zeta)$  линейным сплайном

$$KS := Ispline(a, f) \quad fspl(x) := interp(KS, a, f, x)$$

$$\sigma_1(x) := \frac{E \cdot 10}{(3 \cdot Lt^2)} \cdot \left[ (h-x)^2 \cdot \left( \frac{d}{dx} fspl(x) \right) - 4 \cdot (h-x) \cdot fspl(x) + 2 \cdot \int_0^x fspl(\Delta) d\Delta \right]$$

$$i := 0..n - 1 \quad \sigma_i := \sigma_1(a_i)$$

### График распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образца



$$a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.012 \\ 0.021 \\ 0.032 \\ 0.05 \\ 0.068 \\ 0.093 \end{bmatrix}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} -1.37 \cdot 10^3 \\ -1.161 \cdot 10^3 \\ -644.298 \\ 41.678 \\ 279.08 \\ 30.107 \\ -100.545 \end{bmatrix}$$

Додаток Б – Варіанти завдань для виконання лабораторної роботи

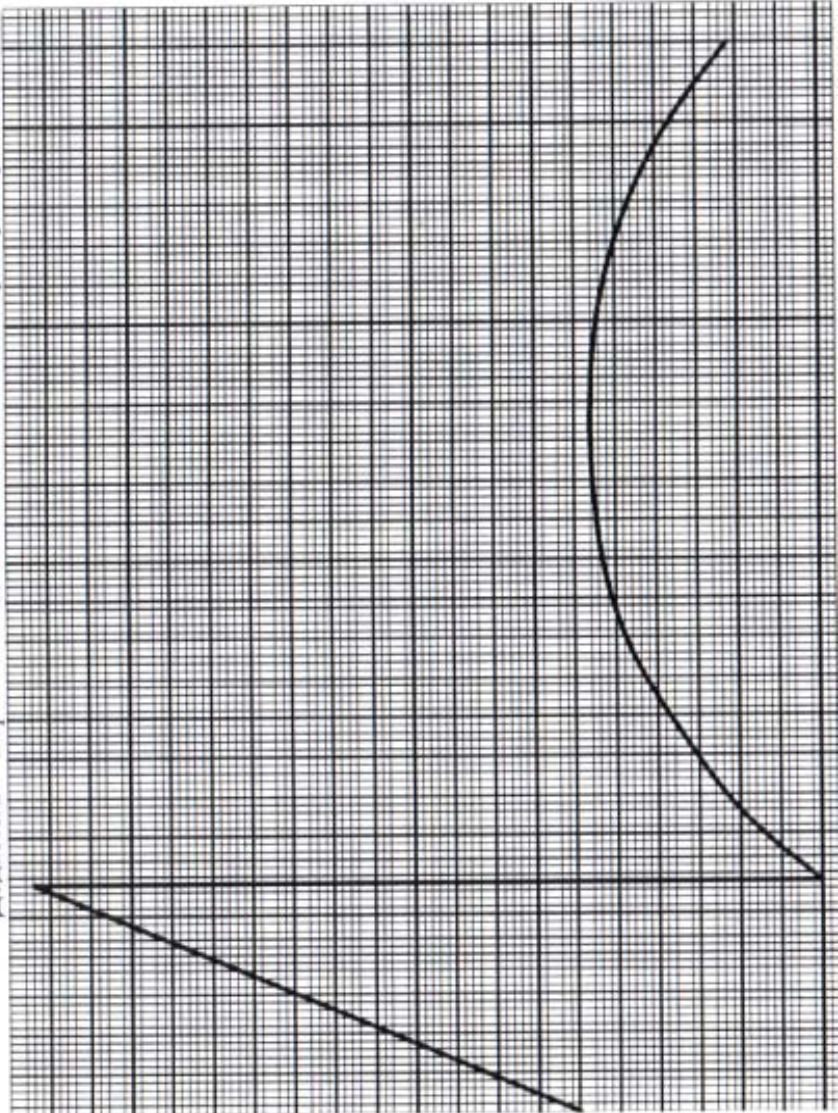
$$L_1 = 41 \text{ мм}$$

$$H = 1.6 \text{ мм}$$

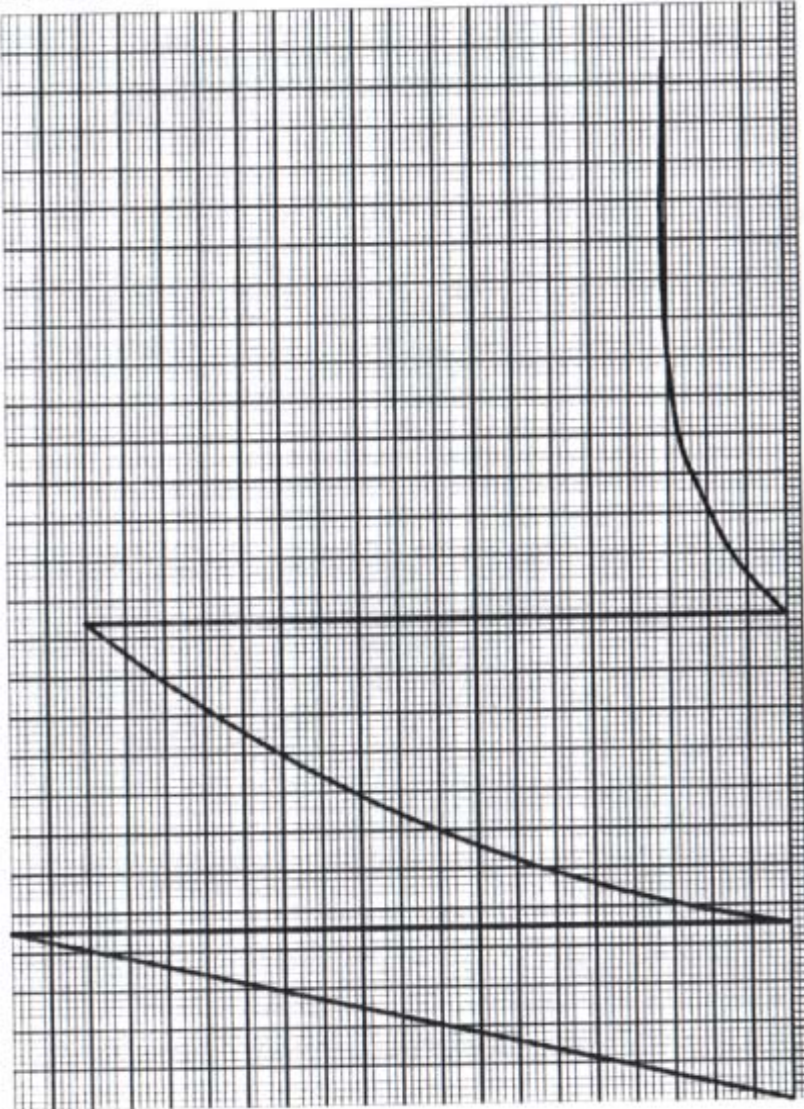
$$Q_1 = 7.625 \text{ Г.}$$

$$Q_2 = 7.342 \text{ Г.}$$

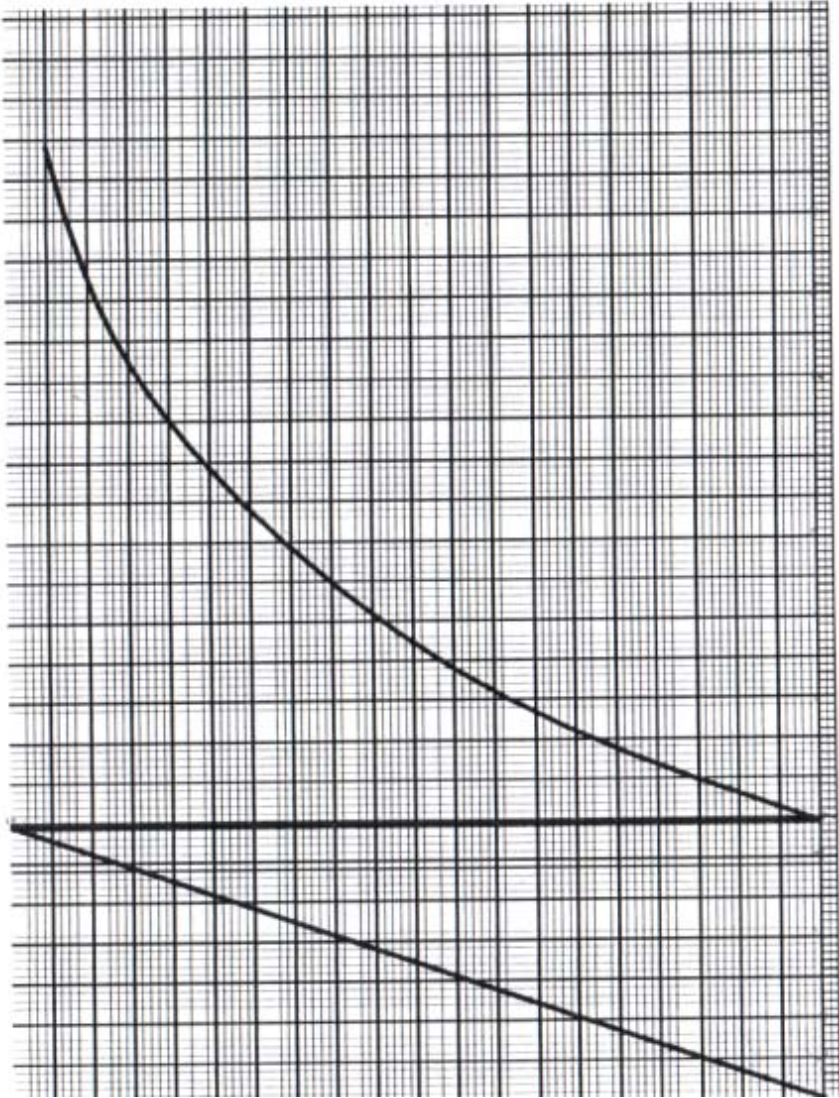
$$E = 2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$



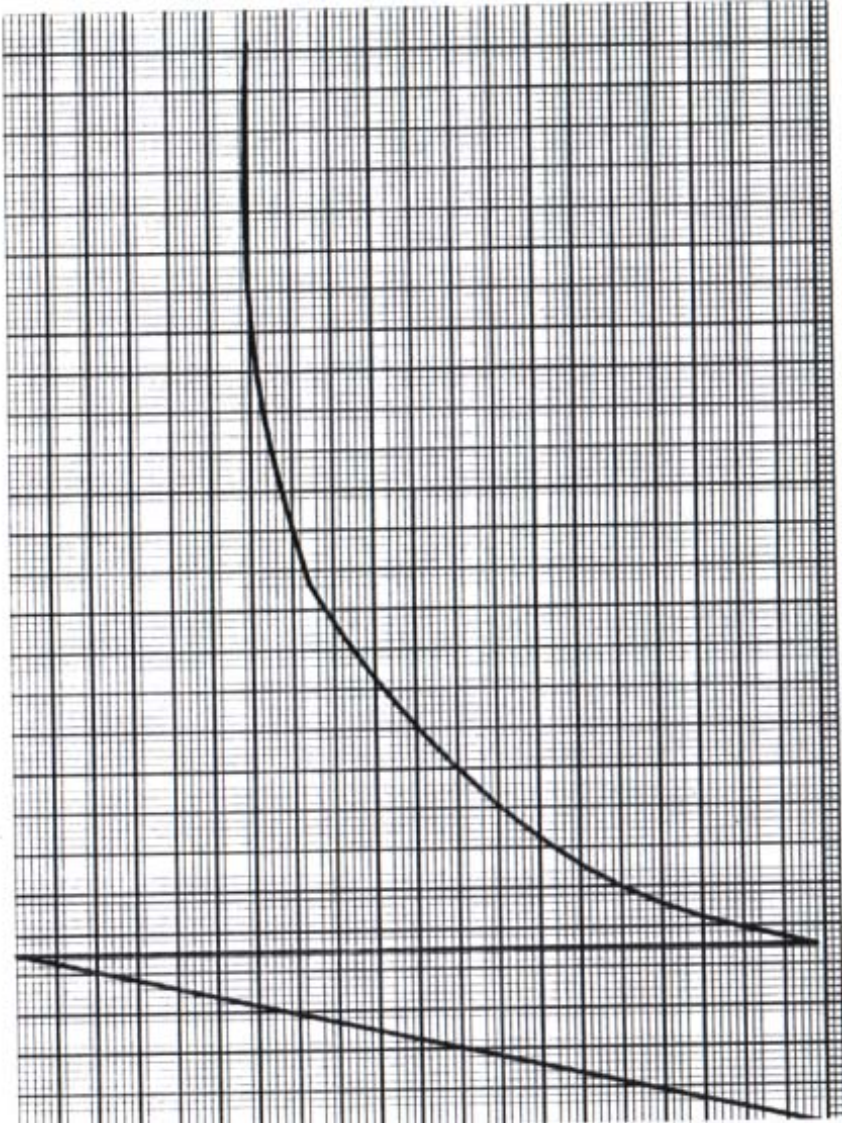
$L_1=46\text{MM}$   
 $H=1.9\text{MM}$   
 $Q_1=7.823\text{Г.}$   
 $Q_2=7.540\text{Г.}$   
 $E=2\cdot 10^5\text{МПа}$



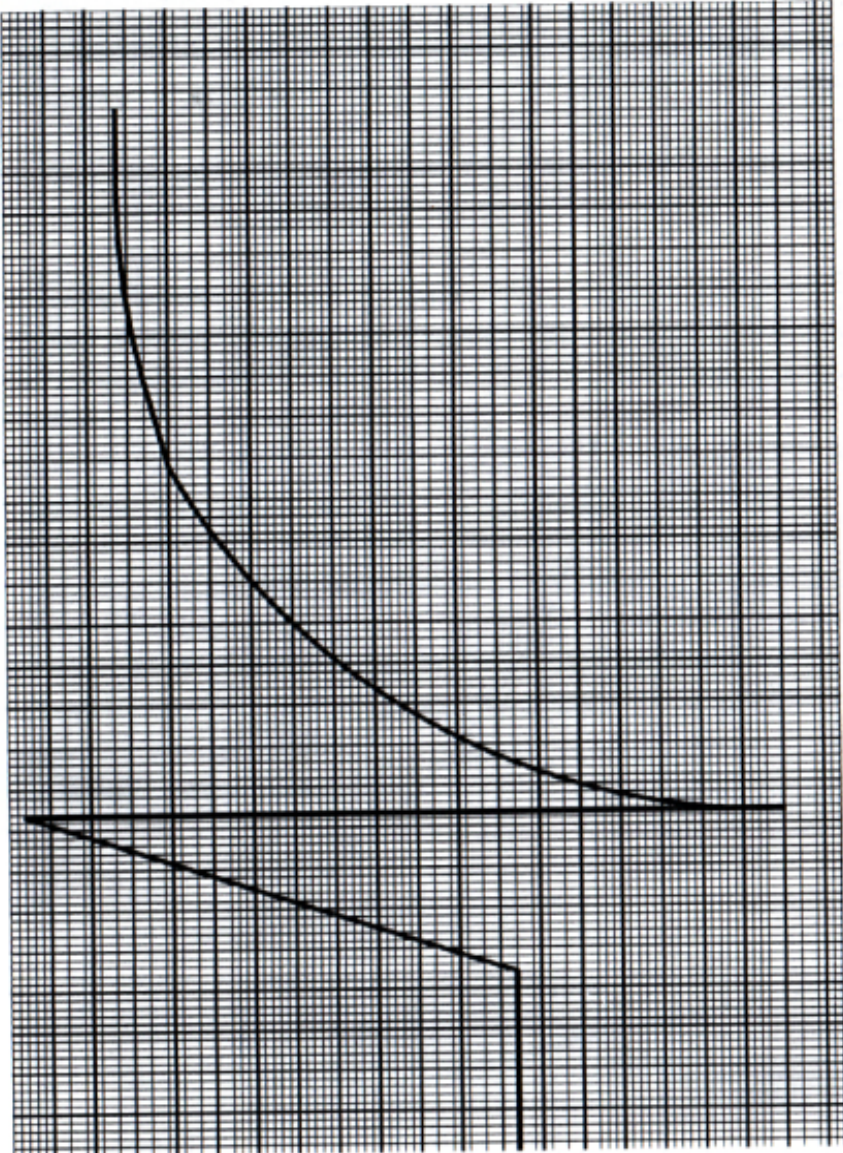
$L_1=43\text{MM}$   
 $H=1.6\text{MM}$   
 $Q_1=8.952\text{r.}$   
 $Q_2=6.69\text{r.}$   
 $E=2\cdot 10^5\text{MPa}$



$L_1 = 47 \text{ MM}$   
 $H = 1.7 \text{ MM}$   
 $Q_1 = 7.325 \text{ Г}$   
 $Q_2 = 7.042 \text{ Г}$   
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

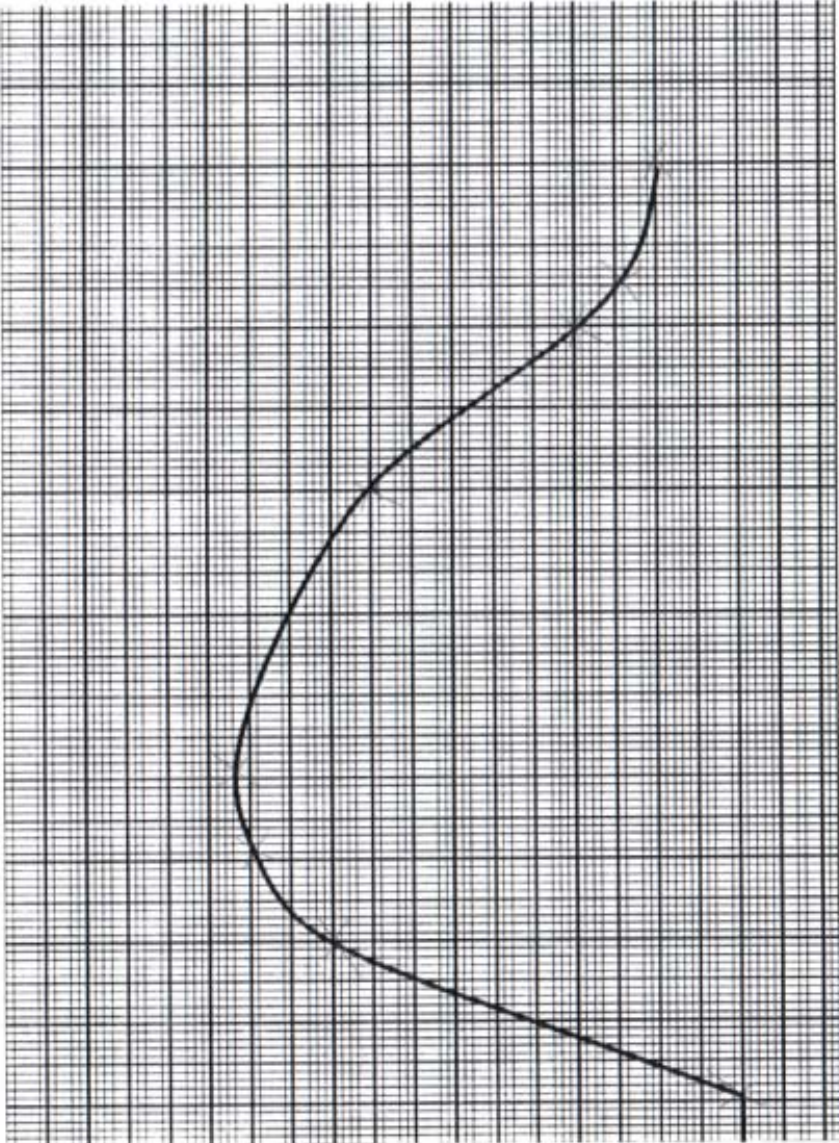


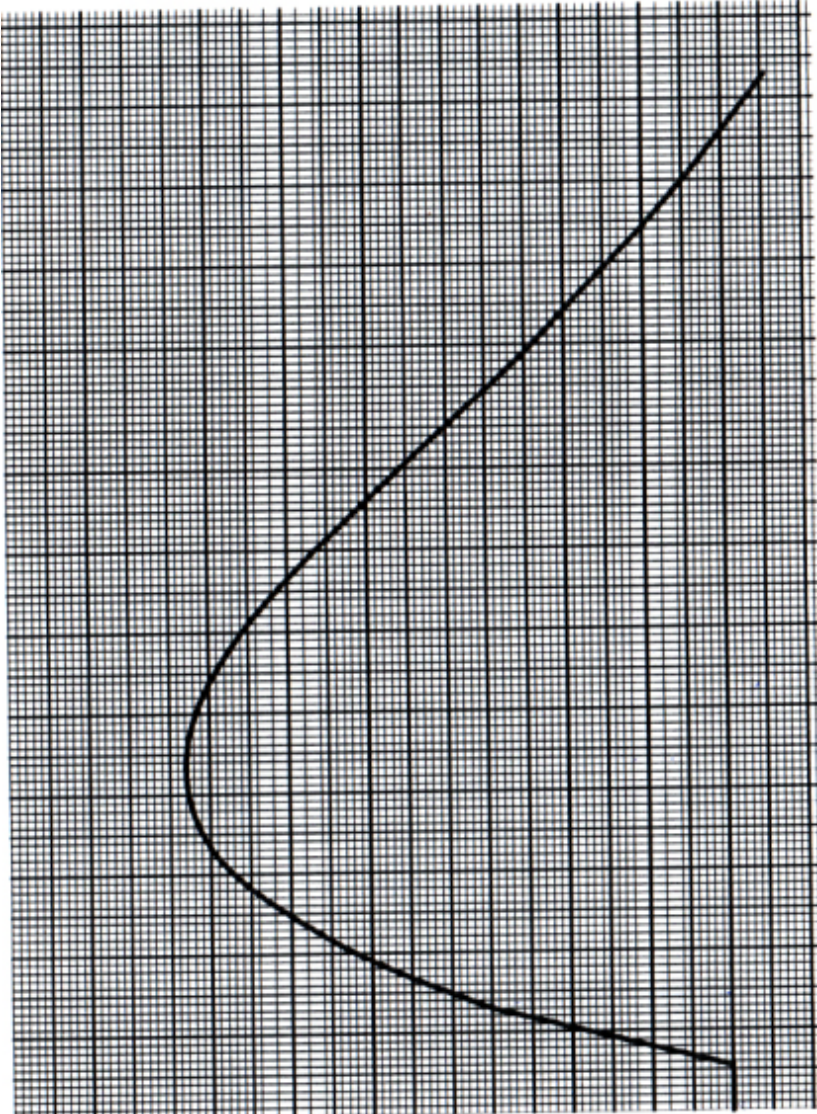
$L_1=41\text{MM}$   
 $H=1.8\text{MM}$   
 $Q_1=6.895\text{r.}$   
 $Q_2=6.612\text{r.}$   
 $E=2\cdot 10^5\text{MPa}$

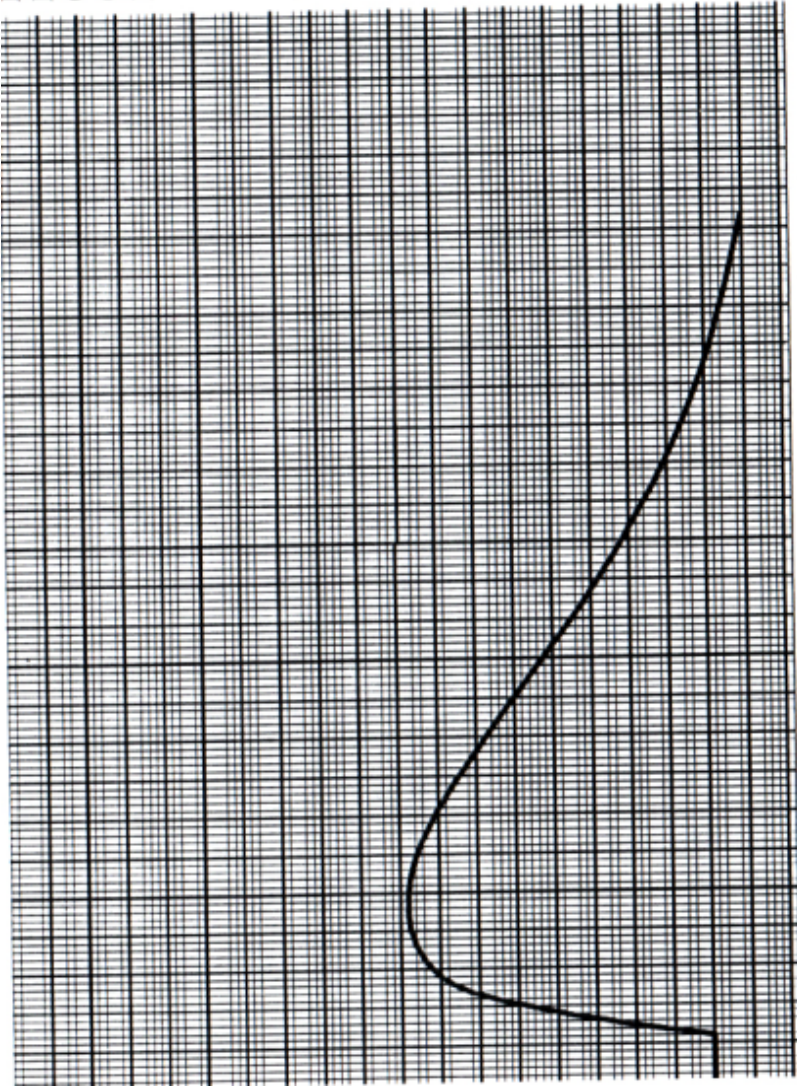




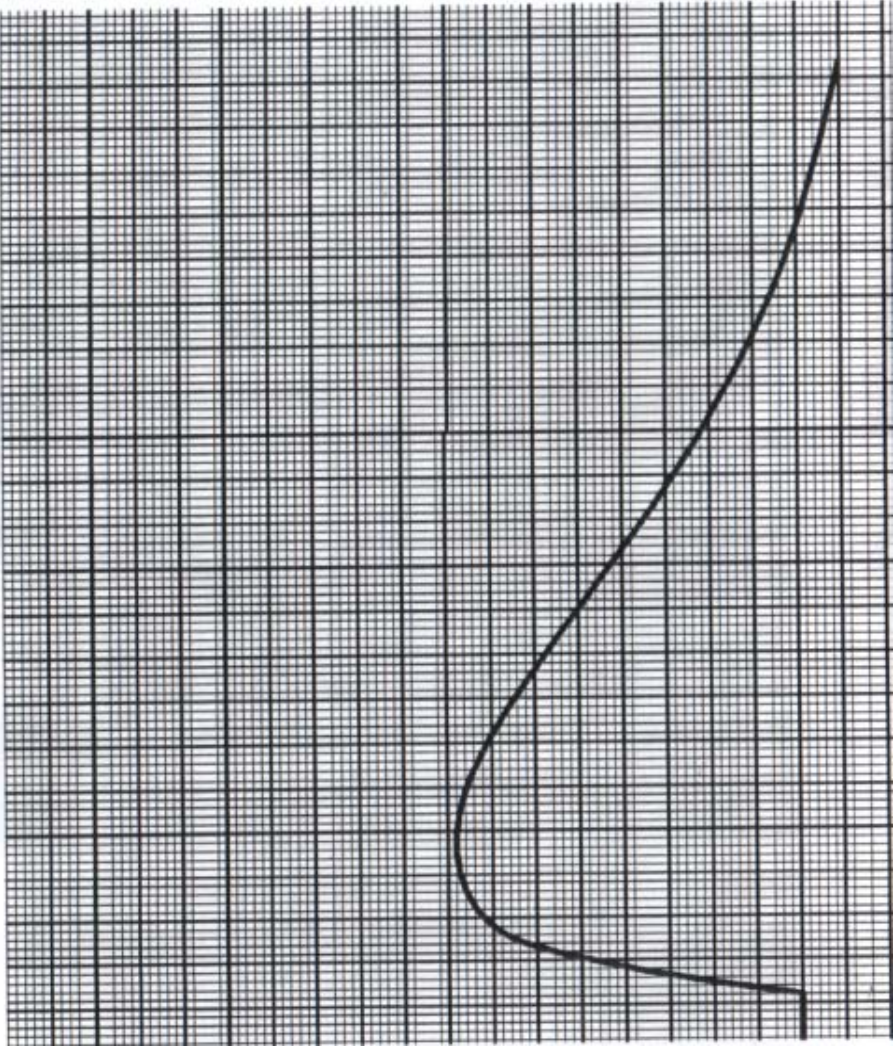
$L_1=45\text{MM}$   
 $H=1.9\text{MM}$   
 $Q_1=7.246\text{r.}$   
 $Q_2=6.963\text{r.}$   
 $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$

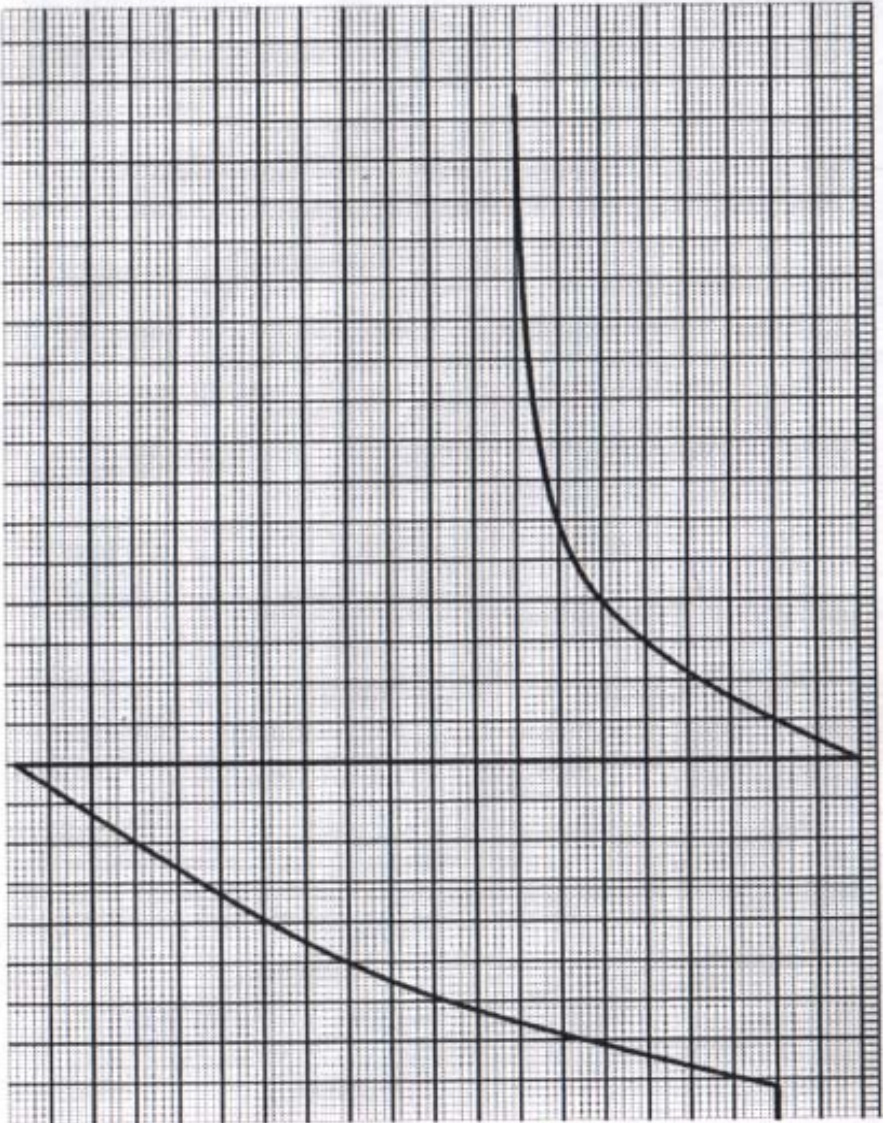


$L_1=43\text{MM}$  $H=1.6\text{MM}$  $Q_1=7.125\text{Г.}$  $Q_2=6.842\text{Г.}$  $E=2 \cdot 10^5 \text{MPa}$ 

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

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



$L_1 = 45 \text{ MM}$  $H = 1.9 \text{ MM}$  $Q_1 = 7.655 \text{ Г.}$  $Q_2 = 7.372 \text{ Г.}$  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ 

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

