

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” за освітньою програмою “Металорізальні верстати та системи” всіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” за освітньою програмою “Металорізальні верстати та системи” всіх форм навчання /Укл. В.В. Солоха, С.В. Танченко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – с.74

Укладач: В.В. Солоха, доцент, к.т.н., С.В. Танченко, ст. викл.

Рецензенти: В.В. Циганов, професор, д.т.н.

Відповідальний
за випуск М.В. Фролов, доцент, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Металорізальних верстатів та
інструментів”
Протокол №____.
від “ ____” 2025

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету

Протокол №____.
від “ ____” 2025

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1. Дослідження точності токарного верстата з ЧПК	4
Лабораторна робота №2. Випробування токарних верстатів на жорсткість	14
Лабораторна робота №3. Виготовлення і градуювання термоелектричних термометрів (термопар)	26
Лабораторна робота № 4. Розрахунок температурного поля і температурних деформацій шпинделя верстата	37
Лабораторна робота 5. Визначення теплопровідності стиків деталей верстатів	57
Додаток А. Результати досліджень для пари контракту	66
Додаток Б. Таблиця Б.1 - F-розподіл (розподіл v^2)	71
Додаток В Таблиця В.1 - t – розподіл Стюдента	72
Додаток Г. Таблиця Г.1 – Номінальна статична характеристика термопари хромель-копель (ХК)	73
Додаток Д. Таблиця Д.1 – Номінальна статична характеристика термопари хромель-алюмель (ХА)	74

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

1.1 Мета роботи

Метою роботи є ознайомлення з методикою і засобами дослідження точності позиціонування токарного верстата з ЧПК шляхом експрес-перевірки.

1.2 Зміст роботи

- Ознайомитися з причинами появи похибок обробки на верстатах з ЧПК.
- Вивчити методику дослідження точності токарного верстата з ЧПК.
- Виконати виміри та розрахунки.
- Зробити висновок про можливу точність обробки конусів на верстаті мод. 16K20Ф3.

1.3 Обладнання та інструмент

- Токарний верстат моделі 16K20Ф3 з ЧПК.
- Тензорезистор.
- Аналогово-цифровий перетворювач (АВП).
- Персональний комп'ютер (ПК).

1.4 Похибки обробки на верстатах з ЧПК та їх оцінка

Дві групи похибок в системі креслення - готова деталь впливають на точність обробки деталей на верстатах з ЧПК. Перша виникає під час розробки та запису керуючої програми на програмоносії. Друга є основною і вноситься технологічною системою верстата з ЧПК безпосередньо при обробці деталей. На технологічну систему, що складається з комплексу верстат - обладнання ЧПК, різального інструменту, пристрою та заготовки, діють внутрішні та зовнішні чинники. Їх вплив обумовлює відхилення від заданого ходу технологічного процесу і погіршує вихідні показники якості роботи верстата. Внутрішніми чинниками є сили різання, сили тертя, вібрації, тепловиділення та нагрівання елементів технологічної системи. До зовнішніх чинників відносять температуру навколишнього середовища, вібрації сусіднього обладнання, коливання напруги в електромережі, вологість і забруднення навколишнього середовища та інше.

Технологічна система верстата з ЧПК включає велику кількість взаємопов'язаних елементів. Характер їх взаємодії не підлягає лінійним чи постійним в часі залежностям. Будь-який поодинокий вимір її параметрів точності відповідає тільки тому стану, в якому система знаходилась в момент виміру. В зв'язку з цим під час комплексної оцінки верстата і обладнання ЧПК при їх взаємодії перевага віддається методу статистичної оцінки точності позиціонування робочого органу верстата. Оцінка точності виконується за підсумками низки повторних випробувань та їх статистичними характеристиками: середньому арифметичному значенню та середньому квадратичному відхиленню. Під точністю позиціонування розуміють відхилення дійсного положення робочого органу верстата від запрограмованого в різних точках шляху його переміщення за однією з координатних осей. Втрата точності обумовлена наявністю під час обробки деталей як випадкових, так і систематичних похибок, що утворюють єдину сукупність розсіювання розмірів. До них відносяться: похибки обладнання ЧПК, похибки приводу подачі (двигуна та передавальних механізмів), геометричні похибки верстата, похибки вимірювальних перетворювачів тощо. Оскільки в верстатах з контурною системою обробки переміщення за однією координатою є функцією переміщення за іншою, то точність роботи верстата може бути визначена шляхом вимірів похибок переміщення за однією з координатних осей.

1.5 Нормування допусків сполучених конусів

Згідно з ГОСТ 25307-82 для сполучених конусів встановлено такі види допусків: допуск діаметру конуса, допуск форми конуса, допуск кута конуса. ГОСТом передбачається спосіб нормування допуску діаметру конуса, згідно з яким встановлюють допуск діаметру T_0 однаковий в будь-якому поперечному перетині конуса, що визначає два граничних конуси, між якими мають знаходитися всі точки поверхні дійсного конуса (рис. 1.1). Допуск обмежує також відхилення кута конуса та відхилення форми конуса, якщо вони не обмежені спеціально меншими допусками. Допуск за вибраним якітетом визначається в відповідності з ГОСТ 25347-82 за номінальним діаметром більшої основи конуса (табл. 1.1).

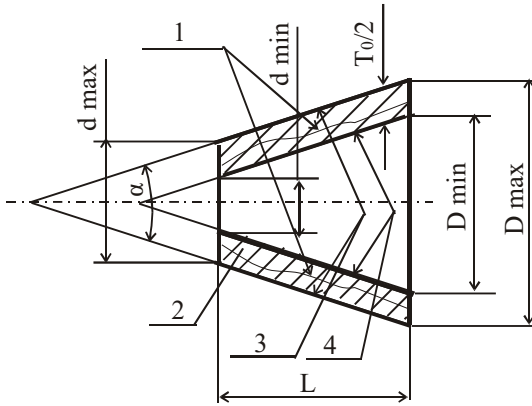


Рисунок 1.1 - Допуск діаметру конуса

Таблиця 1.1 - Допуски конусів, мкм

Інтервали діаметрів, мм	Квалітет допуску								
	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Понад 80 до 120	10	15	22	35	54	87	140	220	350

1.6 Порядок виконання роботи

1.6.1 Експрес перевірка стану верстата під час обточування конусів виконується на холостому ході верстата. Еталонний (шліфований) конус закріплюється в патроні верстата та підтримується центром пінолю задньої бабки. На супорті замість різця встановлюється вимірювальний пристрій і підключається до записуючого приладу. Координати початкової і кінцевої точок на горизонтальній твірній еталонного конуса (для обмеження вимірюваних переміщень наконечника вимірювального пристрою) встановлюються шляхом переміщень супорта в ці точки до одержання повторних показань нуля на шкалі осцилографа. Координати точок фіксуються за цифровою індикацією обладнання ЧПК.

1.6.2 Розробляється програма повторних переміщень супорта з щупом за еталонним конусом і вводиться в пам'ять обладнання ЧПК.

1.6.3 Швидкість подачі супорта і швидкість переміщення стрічки в записуючому приладі необхідно брати однаковою, яка б дорівнювала 500 мм/хв.

1.6.4 Складається програма обробки результатів вимірів на комп'ютері.

1.6.5 Вмикається верстат і записуюче обладнання. Одержані осцилограми піддаються візуальному контролю для виявлення і виключення помилок при вимірах.

1.6.6 Обробка осцилограм виконується вручну, а результатів вимірів - на комп'ютері.

1.7 Засоби вимірювання

Як датчик переміщень (рис. 1.2) застосовується фольговий тензорезистор 2, наклеєний на пластину рівного опору згину 1. При вимірах пластину повинна знаходитися в контакті з еталонним конусом (через кульку 3) з деяким натягом. Тензорезистор виводами 4 через АЦП під'єднується до комп'ютера. Тарування вимірювального пристрою виконується записом показань товщини щупу відомої величини.

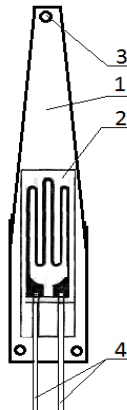


Рисунок 1.2 - Тензодатчик

1.8 Обробка результатів вимірів

В вітчизняній та зарубіжній практиці обробки деталей на верстатах прийняте, що розсіювання їх розмірів за діаметром та довжиною підлягає закону нормального розподілу. В зв'язку з цим пропонується така методика обробки результатів вимірів (приклад графічної обробки осцилограми наведено на рис. 1.3).

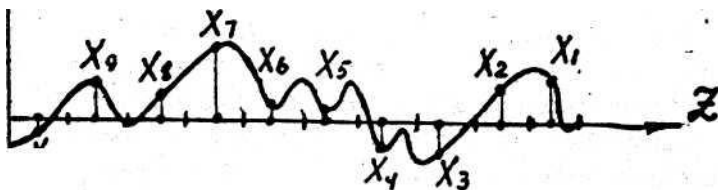


Рисунок 1.3 - Приклад обробки осцилограми

1.8.1 Крива осцилограми накладається на координатні осі X і Z . Кожна осцилограма за віссю Z розбивається на n інтервалів, середини яких є контрольованими позиціями. В кожній позиції проводиться ордината X від нульової лінії до перетину з кривою осцилограми.

1.8.2 За ординатами X вимірюється фактична середня похибка положення супорта в кожній позиції і в мкм, з урахуванням масштабу, заноситься до таблиці 1.2. Решта осцилограм обробляється аналогічно.

1.8.3 Визначають середні арифметичні значення похибок $\bar{X}_n$, дійного положення супорта в кожній з n позиції всіх k осцилограм.

$$\bar{X}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_n$$

1.8.4 Визначається середньоквадратичне відхилення (дисперсія) від середніх арифметичних значень в кожній позиції.

$$S_n^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (X_n - \bar{X}_n)^2.$$

Корінь квадратний з дисперсії, взятий з додатнім знаком, називається середнім квадратичним відхиленням, стандартом чи квадратичною помилкою.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_n - \bar{X}_n)^2}{n-1}}.$$

1.8.5 Систематичні та випадкові помилки складаються з великої кількості елементарних помилок. Наявність результатів, що сильно відрізняються (так званих грубих спостережень) свідчить про порушення закону нормального розподілу. В разі грубих спостережень їх необхідно спочатку виключити, а потім підраховувати середнє арифметичне та дисперсію.

Таблиця 1.2 - Результати вимірів

Номер позиції n	Номер осцилограми, k					Результати розрахунків			
	1	2	3	...	k	$\bar{X}_n$	S_n^2	$\overline{\bar{X}}$	σ
1									
2									
...									
10									

Важливо виключити з експериментальних даних грубі помилки, так званий брак під час повторних дослідів. Для визначення браку можна скористатися критерієм Стюдента

$$\frac{x - \bar{x}}{S} \geq t.$$

Значення t беруть з таблиць t -розподілу Стюдента (додаток Б). Дослід вважається бракованим, якщо експериментальне значення критерію t за модулем більше табличного значення.

Перевірка однорідності дисперсій виконується за допомогою різних статистичних критеріїв. Найпростішим з них є критерій Фішера, призначений для порівняння двох дисперсій.

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}$$

Одержана величина порівнюється з табличною величиною F – критерію (додаток А).

Якщо одержане значення дисперсійного відношення більше наведеного в таблиці для відповідних ступенів свободи та вибраного рівня значимості (зазвичай 0,05), то це означає, що дисперсії значно відрізняються одна від одної, тобто що вони неоднорідні.

F – критерієм можна скористатися навіть в тих випадках, коли число дисперсій більше ніж дві. Для цього з усіх дисперсій виділяють найбільшу та найменшу. За F – критерієм виконується перевірка, чи значимо вони відрізняються між собою. Якщо найбільша та найменша дисперсії не відрізняються значимо, то дисперсії, що мають проміжне значення, також не можуть значимо відрізнятися одна від одної. Тоді всю групу дисперсій можна вважати приналежною до єдиної сукупності.

Якщо кількість дисперсій, що порівнюються більше двох та одна дисперсія значно перевищує інші, можна скористатися критерієм Кохрена. Цей критерій придатний для випадків, коли в усіх точках є однакове число повторних дослідів.

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}.$$

Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо експериментальне значення критерію Кохрена не перевищує табличного значення. Тоді можна усереднювати дисперсії.

Табличні значення критерію при рівні значимості $p=0,05$ для n дисперсій, одержаних в незалежних вибірках об'єму k кожна, при ступенях свобода $k-1$ складає $G_T \sim 0,2829$.

Якщо $G < G_T$ то дисперсії однорідні і генеральна дисперсія σ^2 виміряних похибок не залежить від окремого положення супорта вздовж вірцевого конуса. Для оцінки σ^2 можна скористатись середньозваженою дисперсією S^2 . Цій дисперсії відповідають $f=n(k-1)$ ступенів свободи. Можна вважати, що $\sigma^2 \approx S^2$. Помилка від такої заміни при великому f досить незначна.

1.8.6 Середньозважена дисперсія при однаковому числі ступенів свободи в кожній вибірці визначається формулою

$$S^2 = \frac{\sum_{n=1}^n S_n^2}{n} \approx \sigma^2$$

Величина найбільшого імовірного випадкового розсіювання відхилень від систематичних береться такою, що дорівнює $\pm 3\sigma$. В разі нормального розподілу таке розсіювання охоплює понад 99% усіх можливих відхилень. Поточні похибки позиціонування під час обробки конуса можна подати в вигляді $\Delta_{noz}^{nom} = \bar{X}_n$.

1.8.7 Для вирішення питання про загальну можливу точність позиціонування визначимо генеральне середнє, відносно якого відбувається випадкове розсіювання розмірів X_n .

Всім нашим вибіркам відповідає єдина генеральна дисперсія σ^2 , оцінена середньозваженою дисперсією, якій відповідає f ступенів свободи.

Приймаючи нульову гіпотезу щодо рівності всіх генеральних середніх, за оцінку цього генерального середнього можна взяти загальне середнє $\bar{\bar{X}}$ по всьому експерименту:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \bar{X}_n.$$

Тепер можна визначити його дисперсію $\bar{S}^2$, яка відповідає $n-1$ ступенів свободи:

$$\bar{S}^2 = \frac{k}{n-1} \sum (\bar{X}_n - \bar{\bar{X}})^2$$

Якщо на рівні значимості $p = 0,05$ за табличним критерієм Фішера виконується умова $\bar{S}^2 / S^2 \leq F_{1-p}(n-1, f)$, то найбільшу похибку позиціювання можна визначити

$$\Delta_{noz}^{\max} = \bar{\bar{X}} \pm 3\sigma.$$

1.8.8 12σ порівнюють з допуском і за ним визначають квалітет можливої точності обробки. При запасі точності, що дорівнює 40%, одержимо $T_0 = 0,6 \cdot 12\sigma$, як практичний допуск на обробку конусів.

1.8.9 Точність позиціювання подається графіком в координатах $X-Z$. Окрім $T_0 / 2 = \pm 3\sigma$ на графіку вказуються позиції за віссю Z , запрограмована твірна конуса з координатами початкової і кінцевої точки переміщення, а також $\bar{X}_n$ та $\bar{\bar{X}}$, значення яких відкладаються від цієї твірної.

Приклад такого графіка наведено на рис. 1.4.

1.8.10 Всі розрахунки виконуються на наявному комп'ютері за попередньо розробленою програмою. Результати розрахунку виводяться на друк.

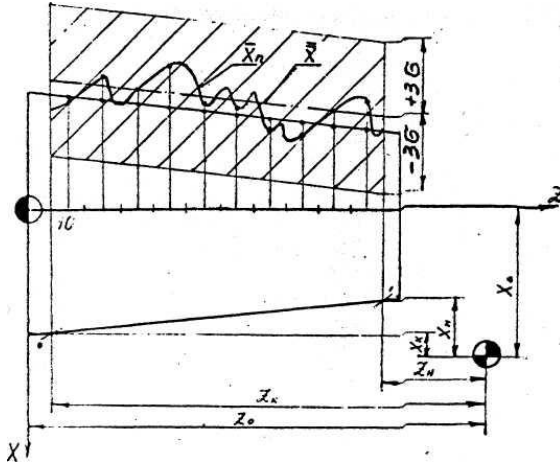


Рисунок 1.4 - Приклад графіка позиціонування

1.9 Зміст звіту

Звіт за лабораторною роботою повинен включати:

1. Осцилограму дослідження та її графічну обробку.
2. Таблицю результатів вимірювання.
3. Результати розрахунків та порівняння критеріїв.
4. Графік позиціонування.

5. Висновки про можливу точність позиціонування верстата 16K20ФЗ.

1.10 Контрольні питання

1. Які чинники впливають на точність обробки деталей на верстатах з ЧПК?
2. Який характер і місце виникнення похибок, що входять до сукупності розсіювання розмірів.
3. Чим обумовлена доцільність застосування методу статистичної оцінки точності позиціонування?
4. В чому полягає зміст методу статистичної оцінки?
5. Як визначаються грубі помилки експерименту?
6. Як здійснюється перевірка однорідності дисперсій?
7. Які засоби вимірювання використовуються в роботі і принцип їх дії.
8. Описати послідовність виконання роботи.

1.11 Рекомендована література

1. ISO 230-2:2014/ Test code for machine tools. Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes.
2. Саленко О.Ф., Вакуленко С.В. Наукові дослідження складних технічних систем: навч. посібник. ч.1. для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / О.Ф. Саленко, С.В. Вакуленко. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 102 с.
3. Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments / Douglas C. Montgomery. — Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc. – 2017. - 749 p.
(https://www.researchgate.net/publication/362079778_Design_and_Analysis_of_Experiments_9th_Edition).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ВИПРОБУВАННЯ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ НА ЖОРСТКІСТЬ

2.1 Мета роботи

Метою роботи є ознайомлення студентів з прийомами тарування динамометра, методикою вимірювання жорсткості вузлів токарних верстатів та побудовою графіків відтискання їх вузлів.

2.2 Зміст роботи

- Виконати тарування динамометра.
- Виміряти жорсткість системи вузлів верстата.
- Побудувати характеристики відтискань вузлів верстата.
- Визначити жорсткість та відносну піддатливість вузлів верстата.

2.3 Обладнання та інструмент

- Верстат.
- Динамометр.
- Пристрій для тарування динамометра.
- Пристрій для вимірювання жорсткості.
- Індикатори годинникового типу.
- Індикаторні стойки.

2.4 Поняття про жорсткість металорізальних верстатів

Для виготовлення деталей заданої точності верстат повинен зберігати точність під навантаженням, тобто його вузли під дією сил, що виникають в процесі обробки, не повинні деформуватись настільки, щоб це могло призвести до недопустимих викривлень форми або розміру оброблюваної деталі.

Деформації технологічної системи “деталь – верстат – інструмент”, які призводять до зміни відносного положення інструмента та заготовки, оцінюються терміном (поняттям) “жорсткість”.

Під жорсткістю вузла розуміють його здатність протистояти пружним деформаціям від дії прикладених до нього зовнішніх сил.

При цьому розглядаються ті деформації, які найбільшою мірою впливають на точність обробки. На токарному верстаті такими будуть деформації в напрямку інструмента, тобто осі Y.

Статичною характеристикою жорсткості j є відношення зусилля F_y до зміщення інструменту відносно заготовки y , $H/мм$.

Поняття жорсткості враховує як пружні властивості системи, так і умови її навантаження.

Існує два суттєво різних методи експериментального визначення жорсткості вузлів верстата: метод навантаження вузлів верстата, що не працює (статичний метод) та метод випробування на жорсткість верстата, що працює (виробничий метод). В даній роботі розглядається перший метод.

При статичному методі вузли верстата навантажують силою, яка за напрямком співпадає з силою різання. Відтискання вузла за віссю Y вимірюється при поступовому збільшенні навантаження в межах від нуля до максимуму.

За одержаними даними будують графік в координатах F_y - y , який називається характеристикою відтискань вузла (рис. 2.1).

Аналіз характеристики відтискань дає можливість виявити низку особливостей вузла верстата, визначити якість його виготовлення та складання.

На характеристиці відтискань крива навантаження не співпадає з кривою розвантаження, тобто спостерігається пружний гістерезис.

Угнутість навантажувальної кривої - показник того, що жорсткість спочатку мала, а зі збільшенням навантаження зростає. Досвід показує, що це можливо в разі, коли в вузла є слабка кріпильна деталь, яка легко деформується, або якщо стики не щільні і дотикання здійснюється не по всій поверхні. В міру збільшення навантаження і деформації площа дотикання деталей збільшується і жорсткість зростає.

Опуклість навантажувальної кривої свідчить про те, що за малих навантажень жорсткість велика, а потім швидко зменшується. Це можливо в випадку, якщо якась проміжна деталь (гайка чи болт) погано закріплена. Таке явище спостерігається також тоді, коли деталі вузла складені з попереднім натягом. Доти, доки зовнішнє навантаження менше за зусилля натягу, деталь поводить себе як жорстке тіло, а зі збільшенням зовнішньої сили розпочинається інтенсивне відтискання і жорсткість різко падає.

Не повернення розвантажувальної кривої в нуль після зняття навантаження свідчить про наявність зазорів в сполученнях вузла.

Відрізок y_1 , що характеризує наявні зазори, його називають розривом характеристики.

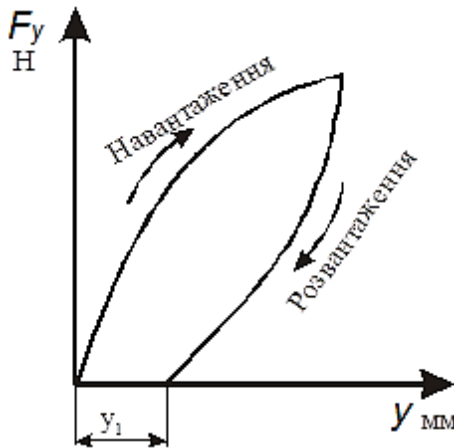


Рисунок 2.1 – Приклад характеристики пружних відтискань

На графіку жорсткості вузла верстата криві навантаження та розвантаження не співпадають, утворюючи петлю гістерезису, площа якої характеризує роботу сил тертя в стиках.

Жорсткість визначається нахилом кривої навантаження характеристики відтискань вузлів.

Норми жорсткості та методика випробувань універсальних верстатів регламентуються стандартами.

Збільшення жорсткості верстатів можна досягти за рахунок:

- підвищення власної жорсткості деталей верстата за рахунок вибору найбільш вигідних в цьому відношенні форм перетинів, застосування ребер жорсткості, рамних конструкцій, додаткових опор та інше;
- зменшення числа стиків в вузлах та між ними;
- усунення зазорів у сполученнях, застосування попереднього натягу та компенсаторів, що автоматично вибирають зазори;
- поліпшення якості (шорсткості) поверхонь, що контактують;
- ретельне складання вузлів та всього верстата в цілому.

Піддатливість (величина обернена жорсткості) кількох деталей та вузлів, що послідовно сприймають навантаження, підсумовується

В зв'язку з цим в першу чергу необхідно зменшувати піддатливість найбільш слабкої ланки.

2.5 Порядок виконання роботи

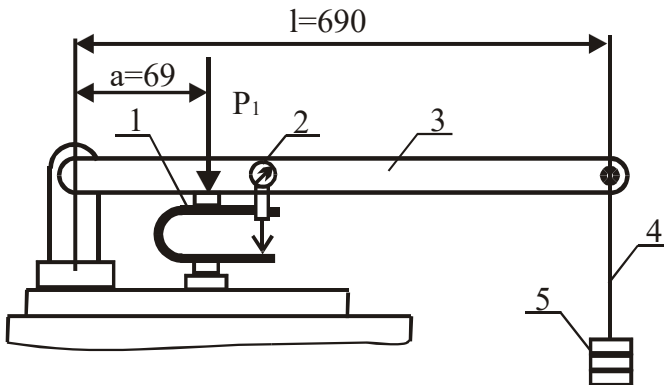
2.5.1 Виконати тарування динамометра. Схема тарувального пристрою наведена на рис. 6.2. Сила P_1 визначається за формулою

$$P_1 = \frac{(G_0 + G) \cdot l}{a} = 250 + 100G, \text{ Н} \quad (2.1)$$

де P_1 - сила, що прикладається до пружини 1 динамометра, Н;

G - маса вантажу, Н;

G_0 - приведена маса важеля та підвіски, $G_0=250\text{Н}$.



1 - тарувальна пружина; 2 - індикатор; 3 - важіль; 4 - підвіска; 5 - вантаж

Рисунок 2.2 - Пристрій для тарування динамометра

Під час тарування фіксують деформацію пружини δ (мм) як при навантаженні, так і при розвантаженні: для визначення жорсткості токарно-револьверного автомата динамометр навантажують такими значеннями сили $P = 0; 250; 500; 1000; 1500; 2000; 3000$ Н.; для дослідження жорсткості токарного верстата динамометр навантажують такими значеннями сили $P = 0; 250; 500; 1000; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000$ Н.

2.5.2 Побудувати тарувальний графік $P_1 - \delta$ та визначити ціну 1мм деформації пружини в Н (Ньютонах).

2.5.3 Підготувати верстат до випробувань.

2.5.4 Виконати перевірку жорсткості у відповідності до пунктів 6 чи 7, в залежності від типу верстата.

2.5.5 Побудувати характеристики відтискання у координатах F_y - y .

2.5.6 Порівняти отримані результати з нормами жорсткості (табл.2.1, 2.4) і дати висновок щодо можливості подальшої експлуатації верстата.

2.5.7 Визначити сумарну жорсткості вузлів супорт-шпиндель за формулою 2.3, Н/мм:

$$j = \frac{F_y}{y}, \quad (2.3)$$

де $F_y = F \cdot \cos \alpha$

Для $\alpha = 60^\circ$, $F_y = 0,5F$.

2.6 Перевірка жорсткості токарно-револьверного автомата

Жорсткість токарно-револьверних автоматів регламентується ГОСТ 18100-80, в якому передбачена перевірка переміщення під навантаженням переднього, заднього та револьверного супортів відносно оправки, закріпленої у шпинделі.

Під час вимірювання переміщення положення вузлів верстата та точки прикладення, напрямку дії та величини навантаження повинні відповідати рисунку 2.3 та таблиці 2.1.

В отворі шпинделя 1 закріплюється контрольна оправка; пристосування з динамометром установлюється в першому від шпинделя пазу переднього чи заднього поперечного супорта; супорт переміщується в положення, що відповідає дії сили P під кутом $\alpha = 60^\circ$.

Для визначення вкладу переміщення окремих вузлів в сумарну піддатливість системи встановити додаткові індикатори, що визначають переміщення шпинделя, різцетримача, супорта, як показано на рис. 2.4.

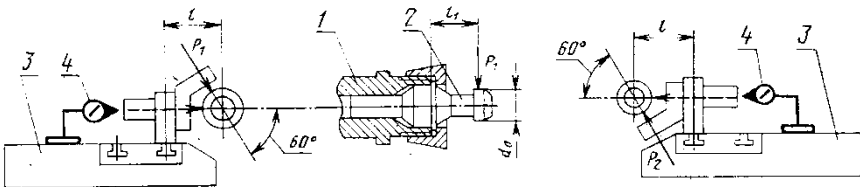


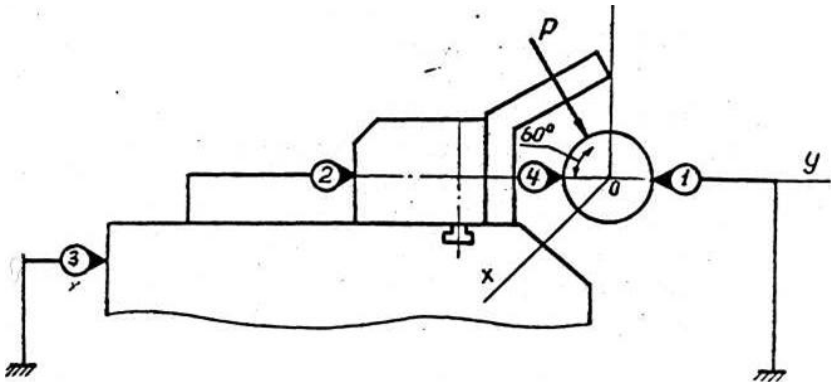
Рисунок 2.3 – Положення вузлів ТРА для перевірки жорсткості

Таблиця 2.1 - Положення вузлів TRA для перевірки жорсткості

Найбільший діаметр оброблюваного прутка , мм	Діаметр револьверно і головки, мм	l , мм	l_1 , мм	d_0 , мм	Допустимі відносні переміщення, мм				Навантажувальна сила P_l , Н,
					для автоматів класів точності				
					Н	П	Н	П	
До 10	До 125	80	38	20	0,30	0,19	2000	1600	
Понад 10 до 16		90	45	25	0,34	0,21	2800	2240	
Понад 16 до 25	Понад 125 до 160	100	52	30	0,40	0,25	4000	3200	
Понад 24 до 40		110	63	35	0,50	0,31	5600	4480	
Понад 40 до 65	Понад 160 до 250	125	75	40	0,63	0,40	8000	8400	

Для вибирання зазорів в вузлах супорта і шпинделя до початку вимірювань навантажити вузли повним навантаженням за допомогою динамометра і зняти його, після чого всі індикатори встановити на нуль, або зафіксувати їх показання.

Навантажити систему супорт - шпindelь послідовно силою, що плавно зростає до заданої величини P_1 , Н. Зняти навантаження. За показаннями індикаторів зафіксувати деформації вузлів як в ході навантаження, так і в ході розвантаження. Повернути шпindelь на 1,5 оберти і повторити вимірювання. Середнє арифметичне двох вимірювань занести до таблиці результатів вимірювань (табл.2.2).



Індикатори вимірювання деформацій: 1 - шпинделя; 2 - різцетримача; 3 - супорта; 4 - підсумкової системи супорт-шпиндель

Рисунок 2.4. - Схема вимірювання жорсткості ТРА

Побудувати характеристики сумарних відтискань системи супорт - шпindelь.

Таблиця 2.2 - Результати вимірювання деформацій, мкм

[illegible]

Визначити відносну величину піддатливості окремих вузлів системи, в відсотках по відношенню до сумарної при найбільшому навантаженні.

2.7 Перевірки токарного верстата на жорсткість

При вимірі жорсткості положення вузлів верстата, точка прикладення сили, що навантажує, а також напрямок її дії повинні відповідати рис.2.5 і табл. 2.3.

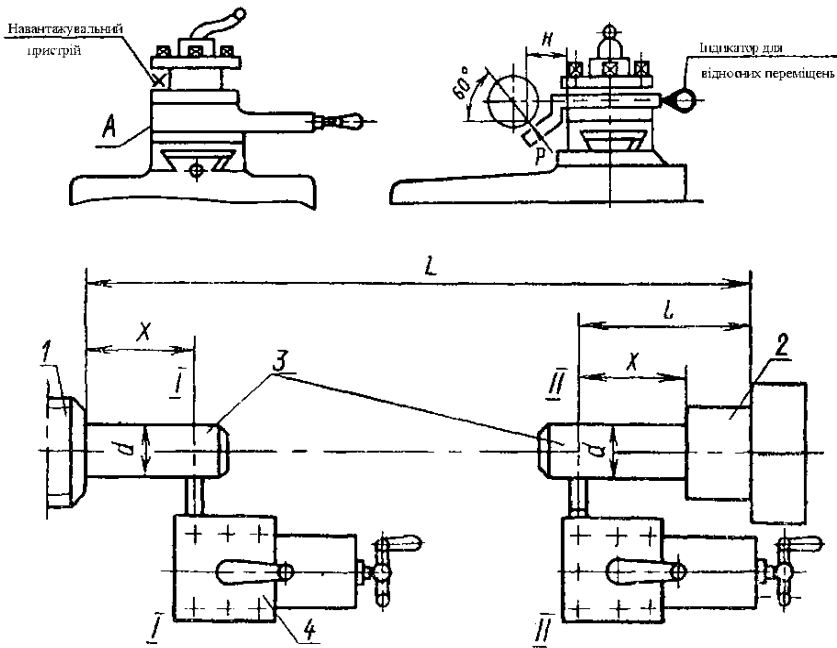


Рисунок 2.5 - Стан вузлів верстата для виміру жорсткості

За табл.2.4 для даного типорозміру верстата визначити максимальне значення сили, що навантажує, і навантажити вузли верстата, зафіксувавши їхню деформацію при навантаженні $P = 0; 500; 1000; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 5600$ Н.

В отвір шпинделя 1 і пінолю 2 вставляють оправки 3.

Навантажувальний пристрій закріплюють у лівому пазу різцетримача 4. Для виміру величини сили, що навантажує, використовують робочі динамометри.

Усі рухомі частини супорта, пінолю, корпус задньої бабки разом з її плитою перед кожним випробуванням переміщують і встановлюють у задані положення, а шпиндель повертають.

Таблиця 2.3 – Параметри стану вузлів під час випробувань

Верстати с найбільшим діаметром оброблювальної деталі	250	320	400	500
Відстань H , мм	38	50	50	67
Відстань l , мм	95	115	140	170
Діаметр оправки d , мм	35	40	40	40
Відстань L , мм				
Конус Морзе				
№	3	4	5	6
Відстань X , мм	45	55	70	90

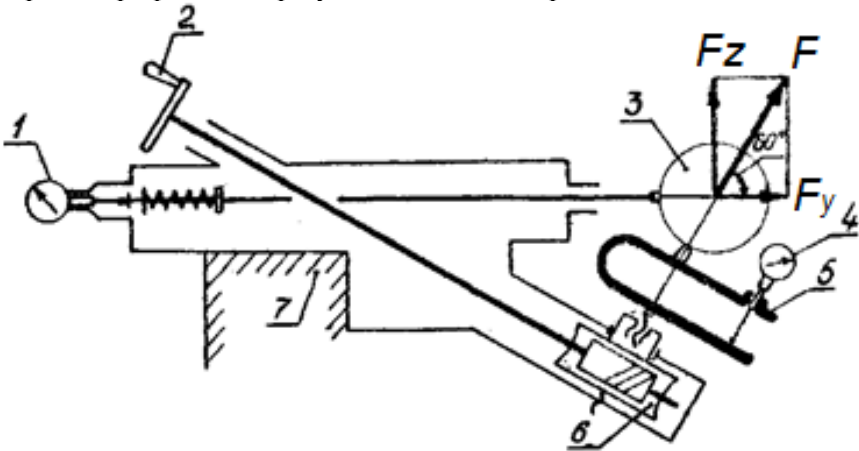
Між шпинделем (пінолю) і різцетримачем під кутом 60° до напрямку поперечної подачі створюють плавно зростаючу до заданої межі силу P .

Для усунення впливу зазорів перед початком виміру жорсткості, поперечний супорт встановлюють у положення перевірки, переміщенням його до лінії центрів верстата зі створенням невеликого натягу пружини індикатора 1 (рис.2.6). Допускається подовжнє (уздовж лінії центрів верстата) зміщення верхнього супорта в межах 0,2 довжини його ходу.

Для вибору зазорів у вузлах супорта і шпинделя до початку випробування двічі навантажити вузли повним навантаженням за допомогою динамометра та зняти навантаження, після чого всі індикатори установити на нуль.

Розвантажити вузли верстата, записавши показання індикаторів за тих же значень сили P . Одночасно індикатором вимірюють (у площині дії сили) відносне переміщення різцетримача і оправки в радіальному напрямку, рівнобіжному напрямку поперечної подачі.

Ці випробування виконати двічі (вдруге - після повороту шпинделя на один оберт). За відносні переміщення вузлів прийняти середнє арифметичне результатів двох вимірів.



1 - індикатор для виміру відтискання; 2 - маховичок для регулювання сили, що навантажує; 3 - оправка; 4 - індикатор для виміру сили, що навантажує; 5 - пружина; 6 - черв'ячна передача; 7 - суппорт

Рисунок 2.6 - Схема приладу для виміру жорсткості

Для спрощеного контролю у виробничих умовах у нормах жорсткості (ГОСТ 18097-88) наводяться значення найбільшого допустимого переміщення вузлів верстата під дією максимальної сили, що навантажує, (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Навантаження та допустимі переміщення вузлів

Верстати с найбільшим діаметром оброблювальної деталі, мм	Сила, Н	Найбільше переміщення різцетримача в мм відносно	
		Оправки в шпинделі	Оправки в пінолю
250	2800	0.13	0.16
320	4000	0.16	0.21
400	5600	0.20	0,27
500	8000	0.27	0.35

Для створення навантаження при вимірі жорсткості металорізальних верстатів застосовують прилади різних конструкцій. На рис 2.6 наведена схема приладу конструкції ЕНІМС, що використовується в даній роботі. Сила, що навантажує, створюється за рахунок осьового переміщення гвинта при повороті гайки, виконаної в черв'ячному колесі. Навантаження на оправку 3, встановлену в шпинделі верстата, прикладається у напрямку дії сили різання F - під кутом 60° до напрямку поперечної подачі. Навантаження визначається за деформацією пружини 5, що вимірюється індикатором 4. Сумарне переміщення супорта 7 і оправки 3 зі шпинделем вимірюється індикатором 1.

2.8 Зміст звіту

Звіт за лабораторною роботою повинен включати:

- 2.8.1 Тарувальний графік.
- 2.8.2 Схему вимірювання відтискань вузлів верстата.
- 2.8.3 Таблицю результатів вимірювання.
- 2.8.4 Характеристику відтискань вузлів.
- 2.8.5 Відносну величину піддатливості вузлів, %.
- 2.8.6 Висновки за результатами роботи і рекомендації щодо збільшенню жорсткості системи супорт - шпиндель.

2.9 Контрольні питання

- Що називається жорсткістю? Як її вимірюють, яка її розмірність?
- Способи підвищення жорсткості.
- Для чого і як будується тарувальний графік?
- Що таке піддатливість системи? Як визначити сумарну піддатливість вузлів, що сприймають навантаження?
- Який вплив найбільш слабкої ланки в системі?

2.10 Рекомендована література

1 1. Бочков В. М. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів [Текст]: підручник за ред. Сіліна Р.І. / В.М. Бочков, Р. І. Сілін, О. В. Гаврильченко. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.

2 Шевченко О.В. Конструкторсько-технологічне забезпечення машинобудівних виробництв. Кінематичний аналіз металорізальних верстатів. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Конструювання та дизайн машин» спец. 131 Прикладна механіка / О.В. Шевченко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 253 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИГОТОВЛЕННЯ І ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕРМОМЕТРІВ (ТЕРМОПАР)

3.1 Мета роботи

Ознайомитися з методами, засобами та технікою виміру температур, технологією виготовлення і градуювання термопар.

3.2 Зміст роботи

Вибрати матеріали, виготовити термопару, дослідити вплив різних факторів на термоЕРС, проградувати термопару.

3.3 Обладнання та інструмент

Термодроти, регульований трансформатор, ванна з графітовим чи вугільним порошком, тримач термоелектродів, електрична піч, зразкова термопара, захисний щиток, посудина Дьюара з льодом, термоопір ТСП, прилад комбінований Щ301.

3.4 Методичні вказівки

Термопарою визначають температуру тіла. Температура – міра кінетичної енергії руху молекул, усереднена по їхньому величезному числу. Отже, температура є умовною статистичною величиною, прямо пропорційною середній кінетичній енергії молекул тіла. Вона визначає ступінь нагріву тіла.

Температура не може бути виражена в абсолютних одиницях виміру, її вимірити безпосередньо (наприклад, як довжину, час) неможливо, тому що в природі не існує еталону одиниці цієї величини. Температуру тіла визначають за допомогою спостереження за зміною фізичних властивостей іншої (робочої) речовини, що при контактуванні з нагрітим тілом (температуру якого визначають) вступає з ним через якийсь час у теплову рівновагу. При цьому в робочої речовини, з якої виготовлений теплоприймач, може змінюватися об'єм, лінійні розміри, внутрішній тиск, електричний опір, величина електрорушійної сили (ЕРС), колір, магнітні властивості і інше.

Прилади для виміру температури розділяються в залежності від принципу дії:

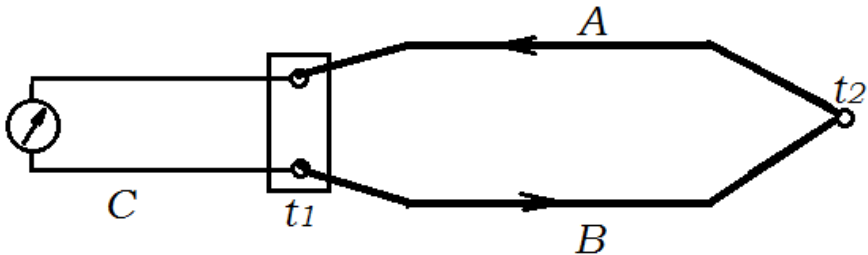
- термометри розширення ($-190^{\circ}\text{C} \dots 500^{\circ}\text{C}$);

- манометричні термометри ($-160 \dots 600^\circ\text{C}$);
- індикатори температури ($100 \dots 800^\circ\text{C}$);
- електричні термометри опору ($-270 \dots 1000^\circ\text{C}$);
- термоелектричні термометри ($-50 \dots 1800^\circ\text{C}$);
- пірометри випромінювання ($100 \dots 6000^\circ\text{C}$).

У термоелектричних термометрах - термопарах використовується властивість різномірних металів і сплавів утворювати в парі термоелектрорушійну силу, що залежить від температури і складу використаних для цього матеріалів.

Термопарою називається найпростіший термоелектричний ланцюг, що складається з двох різномірних металевих провідників, з'єднаних між собою в двох точках і електрично ізольованих один від одного на всьому іншому протязі.

Дія термопари заснована на використанні явища Зеєбека, що полягає в наступному.



t_2 – температура робочого кінця; t_1 – температура вільних кінців
Рисунок 3.1. - Схема термопари

Якщо два провідники (рис. 3.1) з різних металевих матеріалів A та B з'єднані кінцями в замкнений контур і місця з'єднання знаходяться в різних температурах t_2 та t_1 , то в контурі виникає електричний струм. Обидва провідники, які називаються термоелектродами, утворюють термопару. Одне з місць з'єднання, що знаходиться в середовищі з температурою, що вимірюється, є робочим кінцем термопари, інше, що знаходиться в умовах сталої відомої температури, є вільним кінцем термопари.

У назві термопари прийнято першим називати матеріал термопозитивного електрода, другим - термонегативного, наприклад, термопара хромель-алюмель, залізо-константан тощо.

У табл. 3.1 наведені значення термоЕРС деяких металів і сплавів стосовно платини, що зазвичай береться як еталонний метал, за температури вільних кінців 0° , робочого - 100°C .

ТермоЕРС термопари, складеної з будь-якої пари металів, визначається як різниця термоЕРС цих металів стосовно платини, узятій як еталонний провідник.

Щоб виготовити термопару з найбільшим коефіцієнтом термоЕРС, тобто з найбільшою чутливістю, варто брати такі пари металів чи сплавів, різниця термоЕРС яких стосовно еталонного провідника буде найбільшою. Наприклад, термопара, виготовлена зі сплавів хромель і копель (табл. 3.1), дає термоЕРС на 1°

$$2,81 \text{ мВ} - (-4,1 \text{ мВ}) / 100^{\circ} = 0,069 \text{ мВ/град} = 69 \text{ мкВ/град}$$

Таблиця 3.1 - ТермоЕРС деяких металів у парі з платиною за температур вільних кінців 0°C , робочого - 100°C

Матеріал термоелектрода	E, мВ	Матеріал термоелектрода	E, мВ
Вісмут	-7,34	Срібло	+ 0,74
Константан (58 % <i>Cu</i> + 40 %/ <i>Ni</i> + 2 % <i>Mn</i> .)	-3,51	Мідь	+ 0,76
Алюмель	-1,29	Золото	+ 0,78
Копель (56,5 % <i>Cu</i> + 43,5 % <i>Ni</i>)	-4.1	Залізо	+ 1,98
Палладій	-0.57	Ніхром	+ 2,4
Платина	0.00	Хромель (90% <i>Ni</i> +10% <i>Cr</i>)	+ 2,81
Платинародий	+ 0,64	Сурма	+ 4,86

Показання термопари будуть коректні, якщо враховані такі закономірності:

- у контурі, що складається з однорідного провідника, термострум не виникає навіть у тому випадку, якщо окремі ділянки контуру мають різну температуру;
- у контурі, що складається з різнорідних провідників, термострум не виникає, якщо весь контур знаходиться в умовах однієї температури;

- термоЕРС термопари з яких-небудь двох металів дорівнює алгебраїчній сумі термоЕРС термопар, складених з цих металів із третім металом (при вимірів цими термопарами різниці тих самих температур);
- термоЕРС термопари, спаї якої знаходяться при температурах T_1 і T_3 , дорівнює алгебраїчній сумі термоЕРС цієї ж термопари, коли спаї її знаходяться: перший раз при температурах T_1 і T_2 , друг раз - при температурах T_2 і T_3 :

$$E_{T_1 T_2} = E_{T_1 T_3} + E_{T_2 T_3}$$

З цих положень випливає ряд висновків, важливих для практичної роботи з термопарами:

1. для виготовлення термоелектродів варто брати матеріали високої чистоти й однорідності; будь-яка неоднорідність структури чи провідника, наявність сторонніх включень можуть спотворити показання термопари внаслідок неминучих градієнтів температури уздовж електродів і виникнення в результаті цього додаткових (паразитних) ЕРС;

2. при роботі з термопарою можна не звертати уваги на розподіл температури уздовж термоелектродів, якщо він досить однорідний на обох термоелектронах;

3. виникнення термоЕРС у якому-небудь провіднику при наявності уздовж нього градієнта температури в тому випадку, коли його кінці знаходяться при однаковій температурі, свідчить про неоднорідність цього провідника. На цьому заснований метод перевірки однорідності матеріалу термоелектрода;

4. якщо в ланцюзі, складеному з різnorідних провідників, температура на якомусь відрізку постійна, то величина ЕРС між двома будь-якими точками цього відрізка не залежить від того, скільки і яких провідників розташовано між цими точками, і дорівнює тій ЕРС, що виникла б при безпосередньому контакті цих точок. Отже, прилад для виміру термоЕРС можна включати в ланцюг у будь-якій точці термопари, якщо місця контакту термоелектродів із клемми приладу і всі контакти внутрішнього ланцюга приладу знаходяться при однаковій температурі;

5. при роботі з термопарою можна користатися провідниками для приєднання термоелектродів до клем вимірювального приладу, не спотворюючи при цьому величин термоЕРС, необхідно тільки,

щоб обидва контакти проводів, що підводять, з термоелектродами знаходилися в однаковій температурі. Практично важливим висновком є і те, що ЕРС термопари не залежить від способу, з'єднання металів (зварювання чи пайка різними припоями), якщо кожен спай цілком знаходиться при визначеній температурі (зазвичай, повинний бути забезпечений надійний контакт термоелектродів).

У принципі термопару можна скласти з будь-яких двох різних термоелектродів. Однак при виборі електродів для термопари, що передбачається використовувати для виміру температури в конкретних умовах, необхідно брати до уваги таке.

Матеріал термоелектродів повинний бути хімічно досить стійкий за тих температур і в тих середовищах, у яких передбачається використовувати термопару.

Термоелектроди повинні бути хімічно і фізично однорідні, ця однорідність повинна зберігатися в часі.

Залежність величини термоЕРС термопари від температури повинна бути функцією монотонною у всьому інтервалі температур, у якому використовується термопара.

Зміна термоЕРС із температурою повинна бути досить великою, щоб забезпечити необхідну точність виміру.

Крім цих вимог при виборі термоелектродів часто приходиться враховувати пластичність відповідного матеріалу, можливість використовувати його у вигляді дроту чи тонкої стрічки, що значно полегшує виготовлення термопари.

Однієї з головних операцій при виготовленні термопар є пайка чи зварювання термоелектродів. При пайці контакт термоелектродів здійснюється через матеріал припою, тобто в термоелектричний ланцюг входить ще один провідник. При зварюванні наявний безпосередній контакт термоелектродів, але пригранична область між ними являє собою сплав проміжного складу. Однак термоЕРС термопари не залежить від того, зварені чи спаяні її термоелектроди, якщо весь спай знаходиться в одній і тій самій температурі. Спай повинен задовольняти таким вимогам:

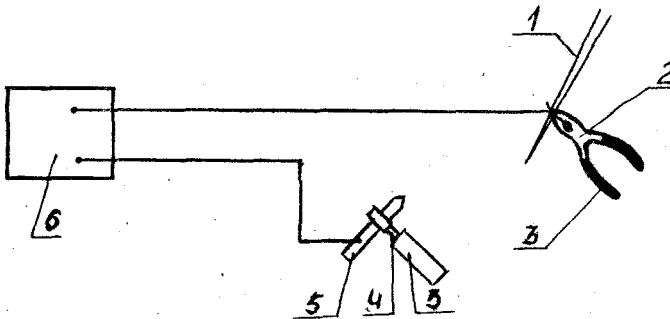
- мати високу механічну міцність;
- мати високу хімічну стійкість; в агресивному середовищі, спай не повинен кородувати помітно швидше термоелектродів;

- мати низький омичний опір;
- мати малу зону неоднорідності за хімічним складом, ступенем зміцнення, тощо;
- мати мінімальні розміри і масу.

Спай може бути виконаний різними способами, наприклад:

- пайкою припоями;
- газовим зварюванням, електрозварюванням у дузі між двома електродами;
- зварюванням у ванні з електролітом;
- зварюванням за допомогою графітового електрода;
- конденсаторним зварюванням;
- зварюванням у ванні графітового чи вугільного порошку тощо.

Зварювання термопари за допомогою графітового електрода здійснюють у такий спосіб (рис. 3.2).



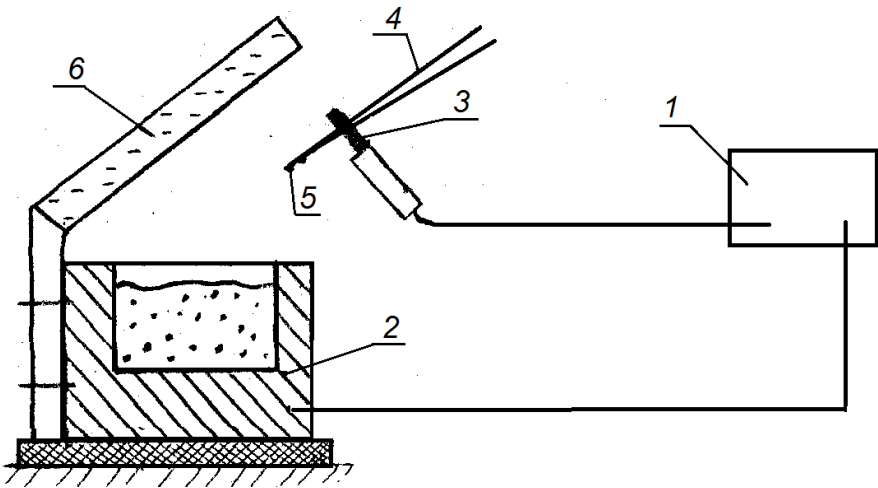
1 -термодріт; 2 - тримач із затиском; 3 - електроізоляція; 4 - тримач електрода; 5 - вугільний електрод; 6 – джерело струму

Рисунок 3.2 - Зварювання термопари графітовим електродом

Термодроти 1 з різних матеріалів (наприклад, хромель і алюмель) прикладають один до іншого, кінці, що підлягають зварюванню, скручують і встановлюють у затиск тримача 2 на відстані 10...20 мм від скрутки. Тримач мідним дротом приєднують до однієї з клем автотрансформатора. До іншої клеми приєднують гостро заточений графітовий стрижень 5, що є іншим електродом. Тримач графітового електрода і тримач термодротів повинні мати електроізоляцію. Для зварювання електроди обережно наближають один до іншого так, щоб

у точці їхнього дотику утворився спай (кулька) діаметром, що незначно перевищує діаметр термодротів.

Для зварювання термопар у ванні графітового чи вугільного порошку (рис. 3.3) електричний струм через регульований трансформатор 1 подається на ванночку з порошком 2, а також на тримач з затискачем 3, куди встановлюються термодроти 4 зі скруткою 5, що зварюються.



1 - джерело живлення; 2 - ванна з графітовим порошком; 3 - тримач із затиском; 4 - термодріт; 5 - скрутка; 6 - захисний екран

Рисунок 3.3 - Зварювання термопар в графітовій ванні

Термоелектроди затискають у тримачі таким чином, щоб скрутка виступала з затискача на 30...50 мм. Кінець скрутки обрізають для того, щоб дуга загоралася на обох термоелектродах одночасно. Потім плавно занурюють скрутку в порошок. Через 1...2 с після загорання дуги скрутку виймають з порошку. Режим зварювання (величину струму, глибину занурення скрутки) підбирають експериментально. Якщо скрутка обгоряє чи утвориться кулька великих розмірів, струм варто зменшити. При малому струмі спай не утвориться.

Отриманий спай оглядають і зачищають.

Кожна термопара, призначена для точних вимірів температур, повинна попередньо градуюватися. Градування полягає у визначенні

залежності ЕРС термопар від температури робочого кінця при температурі вільних кінців, рівній 0°C. Ця залежність зображується графічно чи табулюється.

Найбільш простим та таким, що найчастіше застосовується методом градуювання є метод безпосереднього порівняння з показаннями зразкових (еталонних) приладів - термометрів чи термопар. Градуювання часто проводять по реперних речовинах, що легко можуть бути отримані в чистому вигляді і температура фазових переходів яких (температура плавлення, поліморфного перетворення, кипіння, сублімації і т. і.) визначена з високою точністю. У табл.3.2 наведені для прикладу речовини, що застосовуються в якості реперних для градуювання термопар і апаратури, що реєструє.

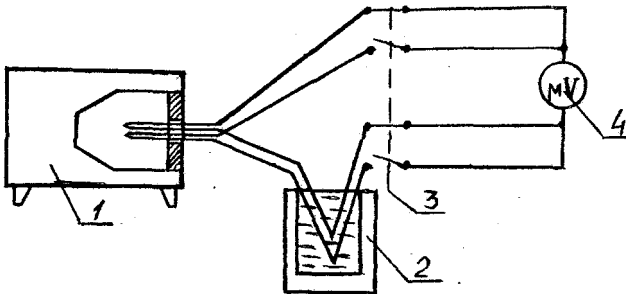
Таблиця 3.2 Найбільш уживані речовини, що застосовуються як реперні для градуювання термопар

Речовина	Характер переходу	Температура переходу, °C
Хлороформ	Плавлення	- 63,5
Чотирихлористий вуглець	„	- 22,95
Вода дистильована	„	± 0,00
Ацетофенон	„	+ 20,5
Азобензол	„	+ 68
Нафталін	„	+ 80,2
Вода	Кипіння	100,00 + $0,0367 \cdot (P - 760)$, де P –атм. тиск,
Йодоформ	Плавлення	+ 119
Нітрат калію	Поліморфне перетворення	+ 128
Гідрохінон	Плавлення	+ 170,3
Нітрат калію	„	+ 336
Сульфат калію	Поліморфне перетворення	583
Хлорид натрію	Плавлення	800,8 ±0,5
Сульфат калію	„	1069

Матеріал сполучних дротів (рис. 3.1) може впливати на точність вимірів, якщо температура місць під'єднання (вільних кінців) неоднакова.

Для стабілізації температури вільних кінців (бажано при 0°C) їх розташовують у пробірці з трансформаторною олією, поміщеною в посудині Дьюара зі здрібненим льодом з дистильованої води. Робочий кінець термопари, що градуують, поміщають у середовище-теплоносій (реперні речовини з табл. 3.2). Знаючи температуру теплоносія (у момент фазового переходу реперної речовини вона дорівнює температурі фазового переходу), визначають значення термоЕРС. Застосувавши речовини з різними температурами фазових переходів, одержують шукану залежність. $E = f(t)$. ТермоЕРС можна фіксувати за допомогою мілівольтметра.

Для градуювання виготовленої термопари методом порівняння необхідно мати еталонну термопару. У цьому випадку робочі спаї термопари, що градуують і еталонної термопар поміщають у середовище-теплоносій 1 (рис. 3.4), наприклад, робочий об'єм електропечі. Вільні кінці обох термопар термостатують у посудині Дьюара 2. У визначені моменти часу фіксують показання еталонної та термопари, що градуують. Дані заносять у таблицю чи зображують графічну залежність $E=f(t)$.



1 - пічка; 2 - посудина Дьюара; 3 - перемикач; 4 - прилад

Рисунок 3.4 - Схема градуювання по еталонній термопарі

3.5 Порядок виконання роботи

3.5.1 Зібрати комплект термодротів, зачистити місце майбутнього спаю, виконати скрутку. Змінні: матеріал термодротів (хромель, алюмель, копель, ніхром, мідь, константан і ін.), їхня

довжина і діаметр.

3.5.2 Зібрати установку для виготовлення спаю (див. рис. 3.3).

3.5.3 Виготовити термопару і дослідити її:

- визначити вплив місця приєднання мілівольтметра в електрланцюгу;
- визначити вплив температури вільних кінців на показання приладу;
- визначити вплив ступеню однорідності і ступеню зміцнення термоелектроду на величину термоЕРС;
- визначити вплив компенсаційних (з'єднувальних) проводів.

3.5.4. Зібрати установку для градуювання (див. рис.3.4) і проградуювати виготовлену термопару. При градуюванні використовувати як еталонну термопару хромель-копель. Залежність термоЕРС цієї термопари від температури надана в додатку В. Результати градуювання занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати градуювання термопари

№ п/п	Показання еталонної термопари		Показання термопари, що градується		Примітки
	мВ	°С	мВ	°С	
					Нагрівання
					“
					“
					Охолодження
					“
					“

3.5.5 Побудувати графік залежності $E = f(t)$ для еталонної та термопари, що градується.

3.5.6 Зробити висновки.

3.5.7 Оформити звіт.

3.6 Зміст звіту

Звіт за лабораторною роботою повинен включати:

- 1.Схему виготовлення термопари в графітовій ванні.
- 2.Результати досліджень за пунктами 3.5.1 - 3.5.4.
- 3.Таблицю з даними градуювання термопари.

4.Графік залежності $E = f(t)$ для еталонної та термопари, що градується.

5.Висновки по роботі.

3.7 Контрольні питання

1. У чому полягає сутність термоелектричного явища?
2. Які основні закономірності впливають з ефекту Зеебека?
3. Що таке температура?
4. Назвіть відомі прилади для виміру температури.
5. Назвіть відомі Вам термопари.
6. Що таке термопара?
7. Що називають холодним, гарячої спаями?
8. Які існують способи виготовлення термопар?
9. Як визначається знак (позитивний, негативний) термодроту?
10. Якими властивості повинен мати спай?
11. Як виконується градування термопар?
12. Навіщо термостабілізується холодний спай при градуванні термопари?

3.8. Рекомендована література

1. Температурні вимірювання: довідник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Єрьоміна, і інші; під ред. О.А. Геращенко. – К.: Наукова думка, 1999. - 704 с.
2. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, та інші; - 2-е вид., доп. та перероб. - Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 544 с.
3. Bernhard F. Handbuch der Technischen Temperaturmessung. Herausgeber F. Bernhard. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014 – 1631 p. <https://www.pdfdrive.to/dl/handbuch-der-technischen-temperaturmessung>

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ШПИНДЕЛЯ ВЕРСТАТА

4.1 Мета роботи

Ознайомитися з методикою розрахунків теплової поведінки шпинделя металообробного верстата; навчитися виконувати розрахунки температурного поля і температурних деформацій деталі з використанням численних методів; проведення модального аналізу деталі.

4.2 Зміст роботи

- Ознайомитися з можливостями програмного комплексу Ansys для дослідження механічних систем.
- Виконати дослідження температурного поля і температурних деформацій шпинделя верстата.
- Провести аналіз отриманих результатів.

4.3 Порядок виконання роботи:

1. Побудувати в графічному редакторі геометричну 3-D модель шпинделя.
2. Імпортувати геометричну модель в програмний комплекс методу скінчених елементів ANSYS.
3. Задати вид аналізу, властивості матеріалу, установити тип скінченого елемента для виконання теплового аналізу.
4. Виконати розбивку геометричної моделі на елементи.
5. Прикласти до моделі навантаження, виконати розрахунок температурного поля, проглянути результати розрахунку, зберегти результати розрахунку.
6. Змінити вид аналізу з термічного на статичний, замінити теплові елементи на сумісні структурні.
7. Прикласти навантаження для виконання розрахунку температурних деформацій, виконати розрахунок температурних деформацій, проглянути та проаналізувати результати розрахунку, зберегти результати розрахунку.
8. Установити режим модального аналізу, ввести необхідні параметри розрахунків, виконати модальний розрахунок для різних частотних діапазонів. Зберегти результати.

9. Оформити звіт з виконаної роботи, який повинен містити опис усіх розрахунків, послідовність виконання роботи, навантаження, що прикладалися на кожному етапі, результати розрахунків та висновки по роботі.

4.4 Рекомендації до виконання роботи

Побудовану геометричну 3-D модель шпинделя зберегти за допомогою стандартів IGES, ACIS, що може бути імпортовано в ANSYS. Файл з геометричною моделлю шпинделя повинен мати у своєму імені латинську абетку, так само як і папки у яких буде знаходитися файл.

Завдання імені

Ім'я аналізу ідентифікує, розв'язувану в ANSYS, задачу. Після завдання вами імені аналізу, це ім'я стає першою частиною імені всіх, створюваних при проведенні аналізу, файлів (розширення є ідентифікатором файлу, наприклад .db).

Використання індивідуального для кожного аналізу імені дозволяє уникнути перезапису файлів раніше вирішених завдань.

Якщо ім'я аналізу не було задано, всі файли одержують ім'я FILE або file, залежно від використовуваної операційної системи. Ви можете змінити, установлене за замовчуванням, ім'я аналізу в такий спосіб:

- Після запуску ANSYS скористайтеся одним з нижчеподаних методів:

Команда:

/FILENAME

GUI:

Utility Menu> File> Change Jobname

Команда /FILENAME дійсна тільки на початковому рівні. Вона дозволяє змінити ім'я аналізу навіть у тому випадку, якщо ви вже задали ім'я під час запуску ANSYS. Задане ім'я застосовне тільки до файлів відкритих після використання /FILENAME і відповідно не застосовне до вже відкритих файлів.

Імпорт геометричних моделей

Імпорт геометричних моделей в форматі IGES.

Імпорт геометричних моделей в форматі IGES можливий зі спрощенням моделі і без спрощення. Для імпорту геометричної моделі в форматі IGES можна скористатися таким шляхом **Utility Menu → File**

→ **Import** → **IGES**. На екрані з'явиться діалогова панель Import IGES File, рис. 4.1.

В розділі Iges Import Option є два перемикачі: ввімкнений перемикач No defeaturing відповідає імпорту моделі без спрощення; перемикач Defeature model відповідає імпорту моделі зі спрощенням

Вмикайте перемикач Defeature model.

Для параметрів MERGE, SOLID, SMALL вмикаємо Yes. Для параметра MERGE це зумовить об'єднання точок, що мають однакові координати, для параметра SOLID забезпечує створення об'ємів за наявності повного набору поверхонь, що обмежують об'єм. Параметр SMALL дає можливість видаляти надмірно малі поверхні (об'єднувати їх із сусідніми поверхнями).

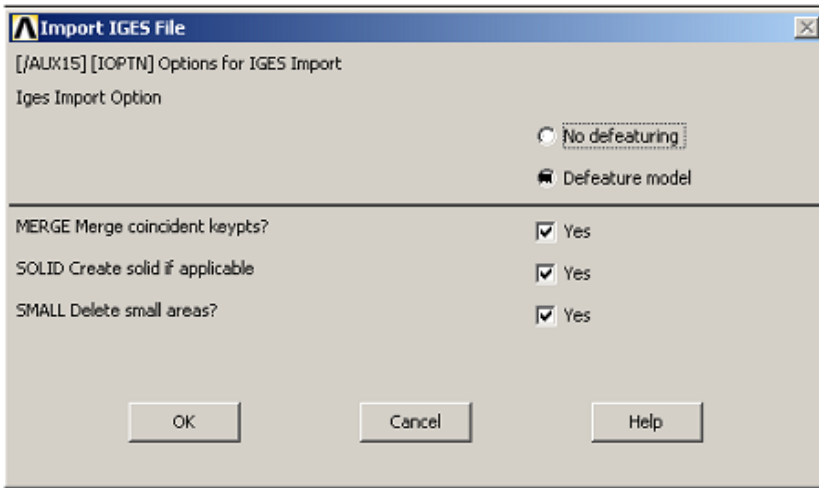


Рисунок 4.1 - Діалогова панель Import IGES File

Після натискання кнопки ОК на екрані появиться панель Import IGES File (продовження) (рис.4.2). Після натискання на клавішу Browser у списку, що випадає, файлів, директорій та дисків вибирається потрібний файл з геометричною моделлю.

Імпорт геометричних моделей в форматі ACIS

Для імпорту геометричної моделі в форматі **ACIS** можна скористатися таким шляхом **Utility Menu** → **File** → **Import** → **SAT**. На екрані з'явиться діалогова панель ANSYS Connection for SAT, рис. 4.3.

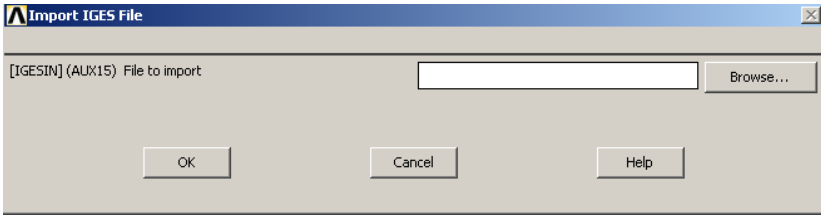


Рисунок 4.2 - Діалогова панель Import IGES File (продовження)

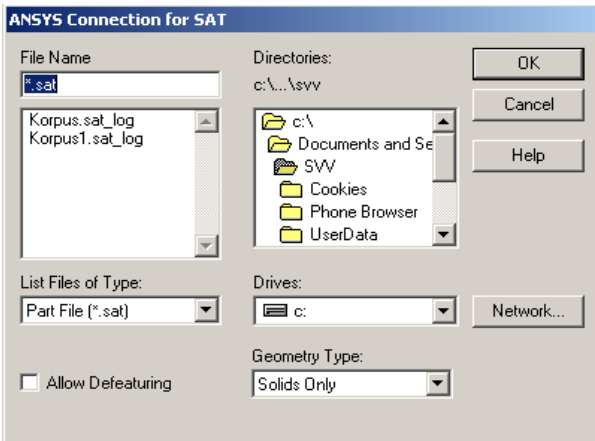


Рисунок 4.3 - Діалогова панель ANSYS Connection for SAT

В діалоговій панелі в полі File Name зазначається назва файлу. В полі Directories зазначається директорій, в якому знаходиться файл. В списку, що випадає, Geometry Type можна нічого не змінювати, оскільки імпортується твердо тільна геометрична модель. Якщо ввімкнути перемикач Allow Defeaturing, то імпорт моделі виконується зі спрощенням, так само як і під час імпорту файлу IGES з опцією спрощення.

Вибір типу задачі

Визначається фізична задача (теплообміну, механіки твердого тіла тощо), що буде розв'язуватися. Це дає можливість активізувати лише ті пункти головного меню, що відповідають зазначеному типу та роблять недоступними пункти головного меню, що не будуть використовуватися для розв'язку даної задачі.

Вибір типу задачі здійснюється за допомогою пункту головного меню: **Main Menu – Preferences.**

З використанням даного пункту, з'являється вікно **Preferences for GUI Filtering** (рис. 4.4), в якому необхідно установити значок проти типу задачі, що планується вирішувати та підтвердити вибір за допомогою кнопки **OK.**

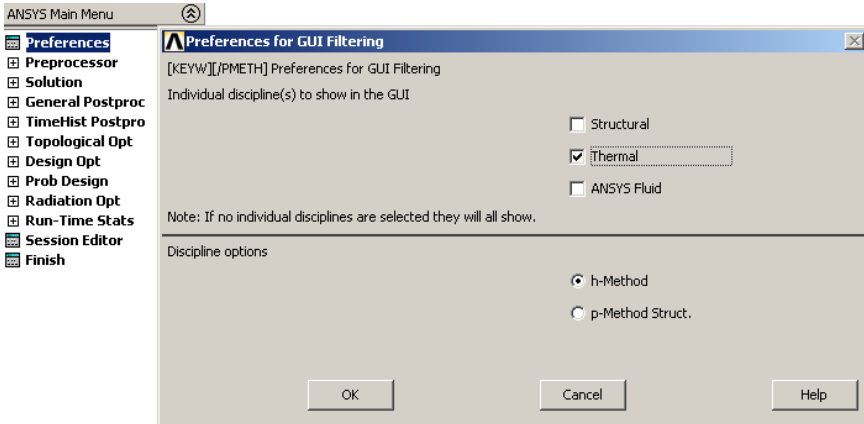


Рисунок 4.4 – Вибір типу задачі, що розв'язується

Після виконання зазначених дій залишаються доступними лише ті пункти головного меню, що безпосередньо пов'язані з обраним типом задачі.

Визначення властивостей матеріалів.

Більшість типів елементів вимагають завдання властивостей матеріалу. Залежно від розв'язуваного завдання, властивості матеріалів можуть бути лінійними або нелінійними. Так само як з типами елементів й дійсних констант, кожен набір властивостей матеріалу має номер посилання матеріалу. Таблиця номерів посилання матеріалів від наборів властивостей матеріалу називається таблицею матеріалу. У межах одного аналізу ви можете мати різні набори властивостей матеріалу (відповідні матеріалам, що використані у моделі). ANSYS ідентифікує кожен набір унікальним номером посилання.

При визначенні елементів, ви вкажете на відповідний номер посилання, використовуючи команду **MAT.**

Лінійні властивості матеріалу.

Лінійні властивості матеріалу можуть бути сталими або залежати від температури, можуть також бути ізотропними або ортотропними. Для завдання постійних властивостей матеріалу (ізотропних або ортотропних) використовуйте один з нижчеподаних методів:

Команда:

MP

Графічний інтерфейс користувача (GUI):

Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models

Ви також повинні задати відповідну мітку властивості; наприклад, EX, EY, EZ для модуля Юнга, KXX, KYY, KZZ для теплопровідності, то що. Для ізотропного матеріалу необхідно задати властивість тільки в напрямку X; властивості за іншими напрямками, за замовчуванням, приймаються рівними властивості в напрямку X. Наприклад:

MP,EX,1,2E11 модуль Юнга для матеріалу з номером посилання 1 дорівнює 2E11

MP,DENS,1,7800 густина для матеріалу з номером посилання 1 дорівнює 7800

MP,KXX,1,43 теплопровідність для матеріалу з номером посилання дорівнює 43

Крім прийнятих за замовчуванням властивостей у напрямках Y й Z (які приймаються рівними властивостям у напрямку X), інші властивості, за замовчуванням, приймаються рівними встановленим у програмі значенням для зниження кількості інформації, що вводиться. Наприклад, коефіцієнт Пуассона (NUXY) за замовчуванням дорівнює 0.3, модуль зрушення (GXY) за замовчуванням дорівнює $EX/2(1+NUXY)$, коефіцієнт випромінювання за замовчуванням дорівнює 1.0.

Можна задати постійні, ізотропні, лінійні властивості матеріалу в доступній через GUI бібліотеці матеріалу. Модуль Юнга, коефіцієнт теплового розширення, коефіцієнт Пуассона, теплопровідність і теплоємність доступні для 10 матеріалів у чотирьох системах виміру одиниць.

Інтерфейс моделі матеріалу.

ANSYS має інтуїтивно зрозумілий, ієрархічний інтерфейс, призначений для завдання моделей матеріалу. Логічне спадне

розташування категорій матеріалу дозволяє легко задати відповідну модель для аналізу. Ви можете використати інтерфейс моделі матеріалу для виконання будь-якого аналізу в ANSYS за виключенням CFD аналізу, що вимагає виконання команд сімейства FLDATA.

Доступ до інтерфейсу.

Інтерфейс моделі матеріалу викликається при виборі наступного маршруту **Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models**. З'являється діалогове вікно **Define Material Model Behavior** (рис. 4.5), що у початковий момент відображає верхній рівень деревоподібної структури.

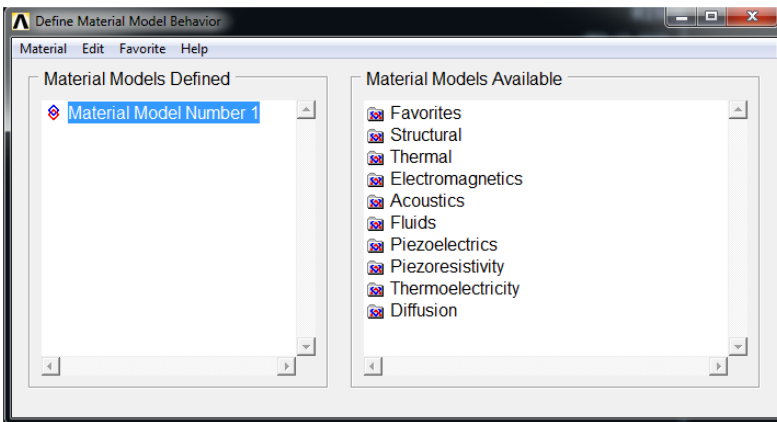


Рисунок 4.5 - Початковий вигляд інтерфейсу моделі матеріалу.

Вибір властивостей матеріалу (рис. 4.6). У вікні **Material Models Available** (доступні моделі матеріалу) із правої боку наведено список категорій матеріалу (наприклад, Структурний, Тепловий, Електромагнітний то що).

Якщо перед назвою категорії знаходиться іконка, то це означає наявність підкатегорії. Після подвійного натискання під категорією, з'являються підкатегорії.

Наприклад, категорія **Structural** містить такі підкатегорії, як **Linear**, **Nonlinear** й інші. Моделі поділені на категорії таким чином, що в остаточному підсумку ви побачите вертикальний список наборів властивості матеріалу або моделі матеріалу, які включені в цю категорію (наприклад, під **Mises Plasticity** перебувають: **Bilinear**, **Multilinear**, і **Nonlinear**). Після того, як ви вирішили, який набір

властивостей матеріалу або модель будете використати, двічі клацніть на обраному пункті. З'являється діалогове вікно, що пропонує вам увести дані для цієї моделі.

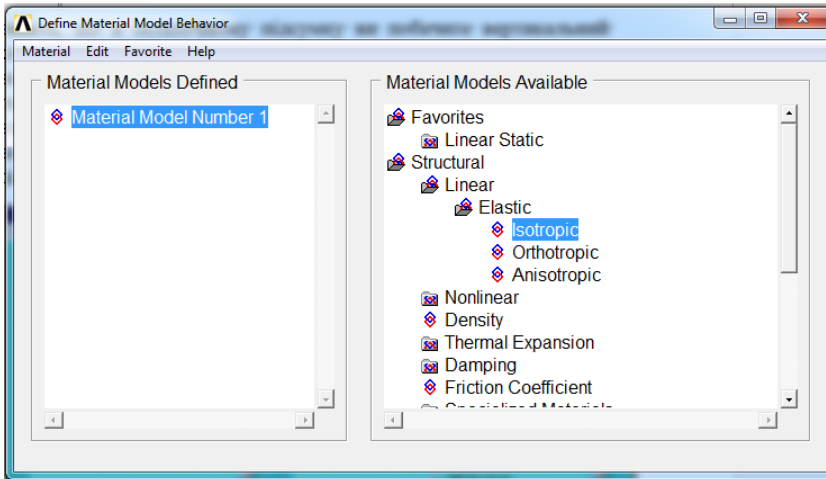


Рисунок 4.6 - Деревоподібна структура інтерфейсу моделі матеріалу.

Для виконання даної роботи необхідно ввести дані до категорій **Structural** та **Thermal**: модуль пружності, густину, коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт теплопровідності. Оскільки сталі відносяться до ізотропних матеріалів, то достатньо ввести дані в напрямку X, враховуючи незначний рівень температур в шпіндельному вузлу коефіцієнт теплопровідності можна брати сталим, незалежним від температури.

Завдання типу елемента

Для завдання типу елементів використовують препроцесор ANSYS (PREP7)

GUI: **Main Menu>Preprocessor>Element Type >Add/ Edit/Delete**

На панелі **Element Type** (рис. 4.7), що з'явиться, ви побачите напис **NONE DEFINED**, оскільки жоден з типів елементів не визначений. Для вибору типу елемента необхідно натиснути клавішу **Add...**, розміщену на панелі зліва внизу, після чого з'явиться панель **Library of Element Type**.

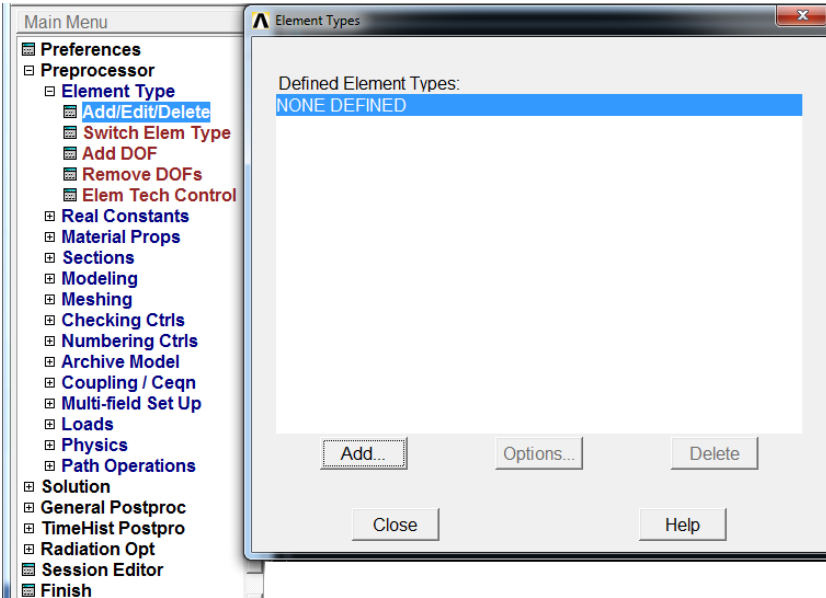


Рисунок 4.7 – Інтерфейс для вибору типу елемента

На панелі **Library of Element Type** (рис.4.8) маємо два вікна вибору: ліве, в якому вибираємо вид елемента за характером аналізу (для теплового аналізу вибираємо Thermal Mass/ Solid), і праве, в якому приведені типи елементів, що відповідають вибраному аналізу (вибираємо **node 90** з 20 вузлами). У вікні Element type reference number з'явиться "1", що означає, що даному типу елемента присвоєно номер 1. Натискаємо клавішу ОК, після чого на панелі Element Type з'явиться напис Type 1 Solid90. Тепер панель можна закрити клавішею Close.

Розбиття твердотільної моделі на елементи

Найбільш зручним засобом створення скінчено елементної сітки є засіб **Mesh Tool** доступ до якого одержуємо через головне меню (рис. 4.9):

Main Menu>Preprocessor>Meshing> Mesh Tool

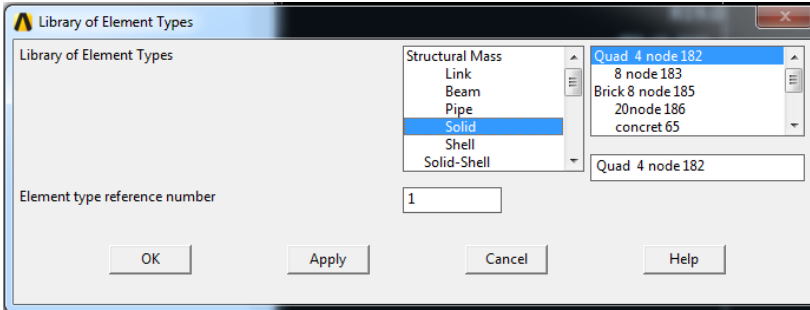


Рисунок 4.8 – Бібліотека типів елементів

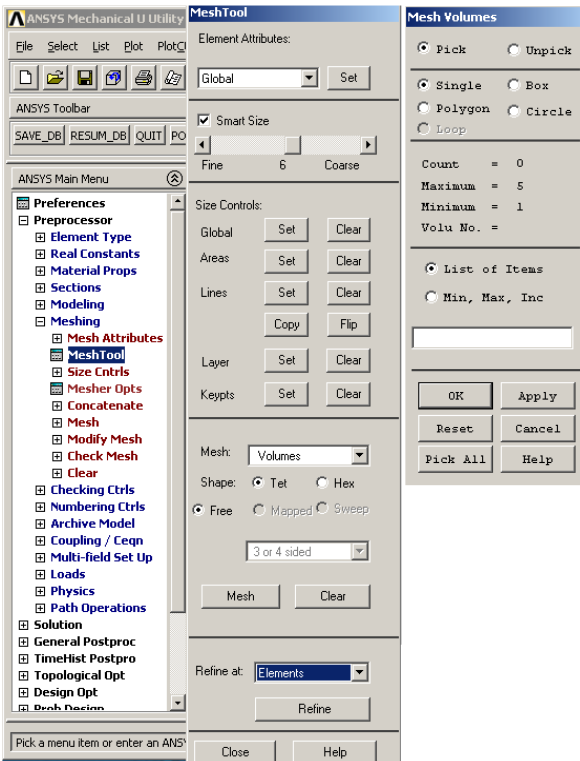


Рисунок 4.9 – Діалогові панелі розбиття моделі на елементи

Mesh Tool це діалогове вікно у якому зібрані практично усі інструменти для налаштування і створення скінчено елементної сітки.

Для автоматичної розбивки геометричних моделей складної форми доцільно активувати розділ Smart Size, після чого становиться активним повзунок і можна установити візуально розміри скінчених елементів сітки (Fine – розміри елементів зменшуються, Coarse - розміри елементів збільшуються). Для деталі типу шпинделя в розділі Mesh вибрати Volume і натиснути кнопку Mesh, в результаті з'явиться панель Mesh Volume. На даній панелі слід набрати команду all і натиснути кнопку OK, або одразу натиснути кнопку Pick all, після чого буде запущена програма розбиття геометричної моделі на елементи.

Прикладення навантаження

Навантаження в тепловому розрахунку задається у вигляді прикладення граничних умов. Граничні умови можна задати як на геометричну модель (ключові крапки, лінії, площі, об'єми), так і на модель скінчених елементів (вузли й елементи). Можете задати п'ять типів теплових граничних умов:

Постійні температури (TEMP)

Це ступінь волі, що задає, звичайно на границях моделі, визначену відому, незмінну величину температури.

Тепловий потік (HEAT)

Це зосереджені вузлові граничні умови. Використовують їх в основному на моделях які складаються з лінійних елементів (провідні стрижні, конвективні елементи й інше), де не можна задати конвекцію або теплові потоки. Позитивне значення величини теплового потоку вказує на те, що вузол приймає тепло. Температура має більший пріоритет, якщо у вузлу заданий і тепловий потік, і температура.

Конвекція (CONV)

Конвекція це поверхнева гранична умова, що задається на зовнішні поверхні моделі для врахування “витоків” тепла в (або придбання тепла від) зовнішнє середовище. Якщо модель складається з лінійних елементів, то конвекцію можна задати за допомогою елемента конвекції LINK34.

Щільність теплового потоку (HFLUX)

Щільність теплового потоку також є поверхневою граничною умовою. Використовують це навантаження коли відома величина тепла, що проходить через поверхню (тепловий потік, що доводиться на одиничну площадку) або обчислене в FLOTTRAN CFD. Додатна величина щільності теплового потоку означає, що тепло поглинається

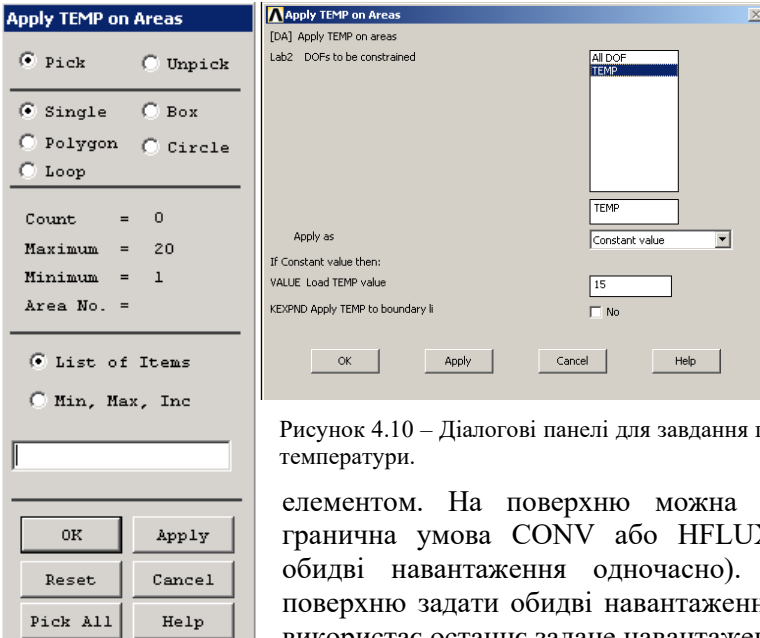


Рисунок 4.10 – Діалогові панелі для завдання граничної температури.

елементом. На поверхню можна задати як гранична умова CONV або HFLUX (але не обидві навантаження одночасно). Якщо на поверхню задати обидві навантаження, ANSYS використає останнє задане навантаження.

В задачі теплового розрахунку шпинделя тепло до шпинделя підводиться від підшипників передньої та задньої опор, тому на поверхня шпинделя, на яких установлюються підшипники задаємо граничні умови у вигляді температур, одержаних з розрахунку в задачі визначення температури в шпиндельних опорах.

Для прикладення навантаження використовують такий шлях ANSYS.

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply >Thermal > Temperature> On Areas

З'явиться панель **Apply TEMP on Areas** (рис. 4.10) і курсор матиме вигляд вертикальної стрілки, якою слід виділити поверхні на геометричній моделі до яких прикладається температура (наприклад під переднім підшипником) та натиснути клавішу Apply. На панелі, що з'явиться у віконці VALUE Load TEMP value зазначити значення температури та натиснути клавішу Apply. Аналогічні дії слід виконати для поверхонь під заднім підшипником, після чого на панелі **Apply TEMP on Areas** натиснути клавішу OK. Панель збережеться.

До поверхонь з яких тепло відводиться за рахунок конвективного теплообміну необхідно задати відповідні граничні умови для чого використовується шлях:

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply >Thermal >Convection> On Areas

Подальші дії будуть аналогічними тим, що виконувалися для завдання температури, але після виділення поверхонь з'являється панель Apply CONV on areas (рис. 4.11). У вікні VALI Film coefficient слід проставити величину коефіцієнту тепловіддачі з виділених поверхонь, у вікні VAL2I Bulk temperature вводиться значення

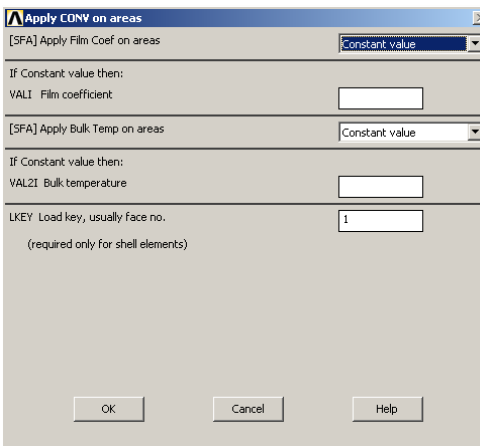


Рисунок 4.11 – Діалогові панелі для завдання конвекції

температури оточення. Панель закривається натисканням клавіші ОК. Подібним чином вводиться значення конвекції на інші поверхні, значення коефіцієнту тепловіддачі для яких відрізняється. Слід зауважити, що параметри розмірність коефіцієнту тепловіддачі повинні відповідати розмірності геометричної моделі

Після формування математичної моделі можна виконувати розрахунок температурного поля шпинделя. Для запуску

програми на розрахунок слід скористатися таким шляхом:

Main Menu>Solution> Solve> Current LS

Після завершення розрахунків можна переглянути результати розрахунків для чого необхідно спочатку задати команду на читання результатів та перегляд результатів (рис. 4.12):

Main Menu> General Postproc> Read Results>First Set

Main Menu> General Postproc>Plot Results>Nodal Solu

Для збереження математичної моделі слід періодично зберігати результати роботи, для чого слід натиснути клавішу SAVE_DB або скористатися таким шляхом

Utility Menu → File → Save as Jobname .db

Результати теплового розрахунку зберігаються у файлі з розширенням *.rth.

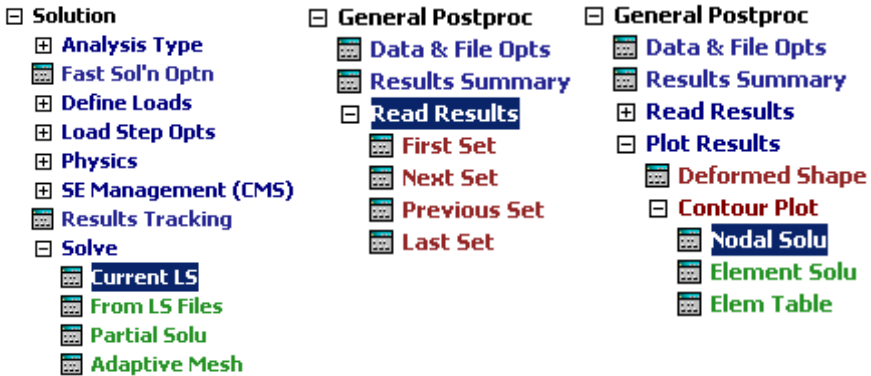


Рисунок 4.12 – Послідовність дій для запуску розрахунку, читання та перегляд результатів

Проведення структурного аналізу

Для визначення теплових деформацій проводиться структурний аналіз в ході якого можуть визначитися переміщення, деформації, напруження, що виникають в процесі нагрівання деталі. Для виконання структурного аналізу необхідно зайти в пункт головного меню: **Main Menu – Preferences**. Внаслідок з'являється вікно **Preferences for GUI Filtering** (рис. 4.13), в якому необхідно установити значок проти завдання **Structural**.

Якщо на початку створення моделі були задані властивості матеріалів і для структурного аналізу то даний етап можна пропустити. Необхідно змінити тип елемента з теплового на структурний для чого слід виконати таке:

Main Menu>Preprocessor>Element Type >Switch Elem Type

З'явиться діалогова панель Switch Element Type (рис. 4.13), в якій у вікні Change element type, необхідно вибрати Thermal to Struc, тобто замінити термічний елемент на сумісний структурний. Натискаємо команду OK.

Наступним кроком необхідно задати навантаження для структурного аналізу, яке задається переміщеннями на поверхнях, де

розміщені підшипники та температурним полем деталі, одержаним в тепловому розрахунку. Як і у випадку завдання навантаження для телового розрахунку, навантаження для структурного розрахунку задається з головного меню за таким шляхом:

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply >Structural >Displacement >On Areas

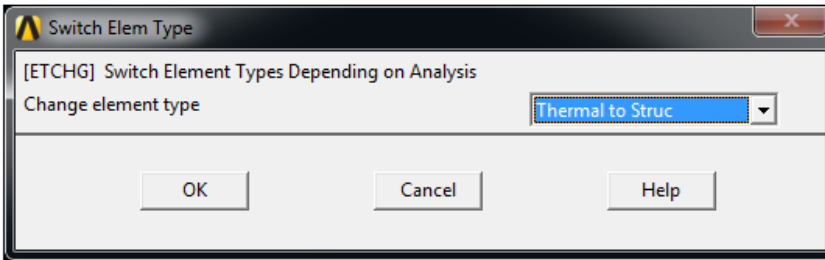


Рисунок 4.13 – Діалогова панель заміни типу елемента

Після появи панелі **Apply U,ROT on Areas** (аналогічний рис. 10) слід позначити поверхні до яких прикладається навантаження у вигляді переміщення. Появиться діалогова панель **Apply U,ROT on Areas** (рис. 4.14), в якій слід виділити відповідне переміщення та задати його величину у вікні VALUE Displacement value після чого натиснути команду Apply та задати переміщення за рештою координатних осей за аналогією. Для поверхонь шпинделя, на яких змонтовані підшипники, що сприймають радіальне і осьове навантаження слід задати нульові значення переміщень за усіма координатами, там же де підшипники сприймають лише радіальне навантаження слід задати нульові значення для переміщень лише в цих напрямках, не обмежуючи переміщення осьові.

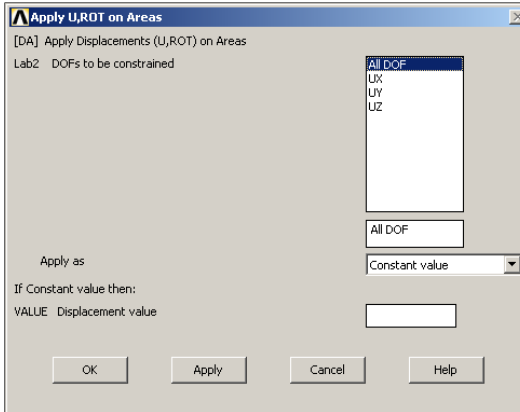


Рисунок 4.14 – Діалогові панелі для завдання навантаження у вигляді переміщень

Для прикладення до шпинделя температурного навантаження слід виконати таке:

Main Menu>Solution>Define Loads>Apply >Structural >Temperature>From Term Analy

З'явиться панель **Apply TEMP from Thermal Analysis** (рис. 4.15) на якій слід натиснути клавішу Browse... та вибрати файл з результатами температурного розрахунку, який має розширення rth.

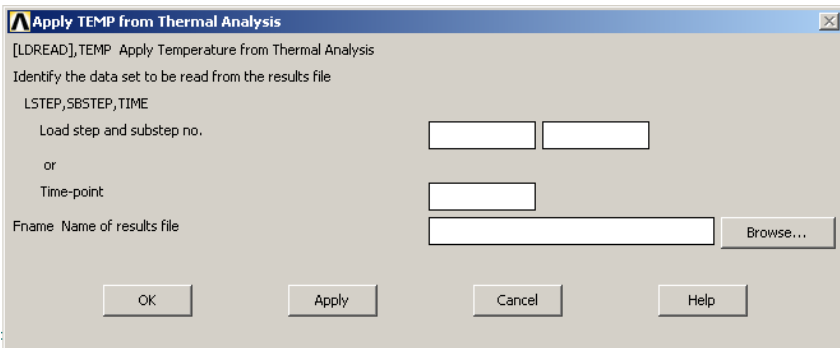


Рисунок 4.15 – Панель для прикладення теплового навантаження

Виконання розрахунку та перегляд результатів розрахунку виконується аналогічно, як і для теплового розрахунку. Результати

структурного аналізу записуються в файл структурного аналізу Jobname.RST. В результаті розрахунку одержують такі дані:

- основні дані: вузлові переміщення (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ);
- похідні дані: вузлові і елементні деформації; вузлові і елементні напруження; сили на елементах; вузлові реакції.

Виконання модального аналізу

Модальний аналіз (команда **ANTYPE, MODAL**) використовується для визначення власних частот і форм коливань конструкції. Передбачається, що здійснюються вільні незгасаючі коливання.

Модальний аналіз зазвичай передує іншим видам динамічного аналізу. Результати модального аналізу дають можливість визначити деякі параметри і співвідношення, необхідні для інших видів аналізу.

Для створення моделі і виконання розрахунків використовується той самий набір команд, що і для виконання інших розрахунків.

Процедура розрахунків власних форм і частот коливань складається з таких етапів:

1. Створення моделі.
2. Прикладення навантажень і отримання результатів.
3. Розширення форм.
4. Перегляд результатів.

В ході виконання модального аналізу використовуються лише лінійні властивості; наявні нелінійні елементи сприймаються як лінійні. Для проведення аналізу слід зазначати модуль пружності EX та густину матеріалу DENS.

В комплексі ANSYS для виконання модального аналізу може використовуватися декілька різних методів. В даній лабораторній роботі доцільно користуватися блоковим методом Ланцоша (Lanczos), який використовується для одержання власних частот у великих симетричних задачах.

Основні операції з ANSYS- меню в модальному аналізі

1. Визначення типу аналізу

Main Menu: Solution → Analysis Type → New Analysis

Встановлюємо тип аналізу - **Modal**.

2. Задаємо опції модального аналізу

Main Menu: Solution → Analysis Type → Analysis Option

На екрані з'явиться діалогова панель Modal Analysis (рис. 4.16). В цій панелі слід зазначити опції розрахунку власних частот і відповідні їм власні форми. Вибираємо метод- Блоковий Lanczos (за умовчанням).

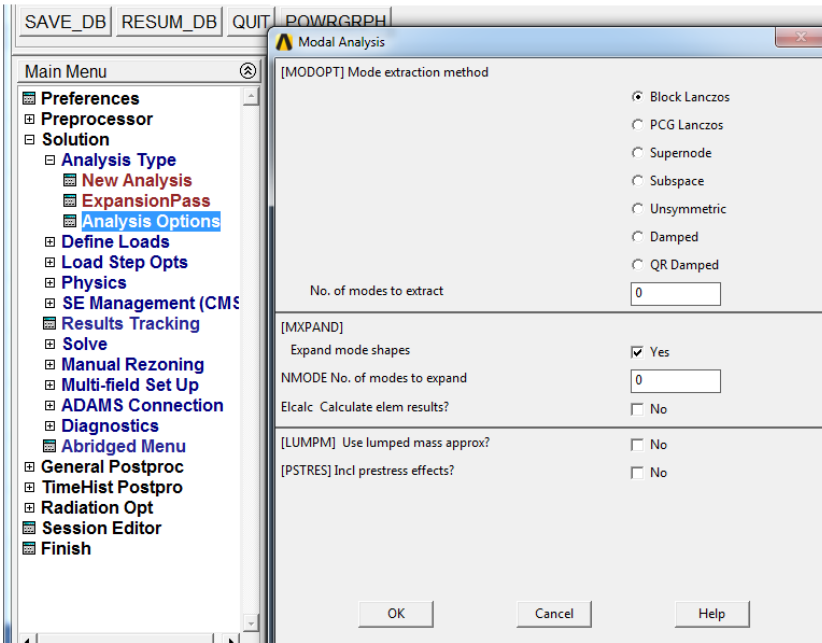


Рисунок 4.16 – Діалогова панель Modal Analysis

В полі No. of modes to extract (кількість власних частот і форм, що визначається) зазначається потрібна кількість, в полі NMODE No. of modes to be expanded – така сама кількість, а ознаки Expand mode shapes та Ecalc Calculate elem results повинні мати значення Yes.

Після натискання на кнопку ОК діалогова панель Modal Analysis закривається, а на екрані з'являється інша панель Bloc Lanczos Method, (рис. 4.17). В цій діалоговій панелі в полі FREQB Start Freq зазначається початкова частота діапазону, в якому ведеться пошук власних частот, а в полі FREQB End Frequence – кінцева частота. Натискання кнопки ОК закриває діалогову панель.

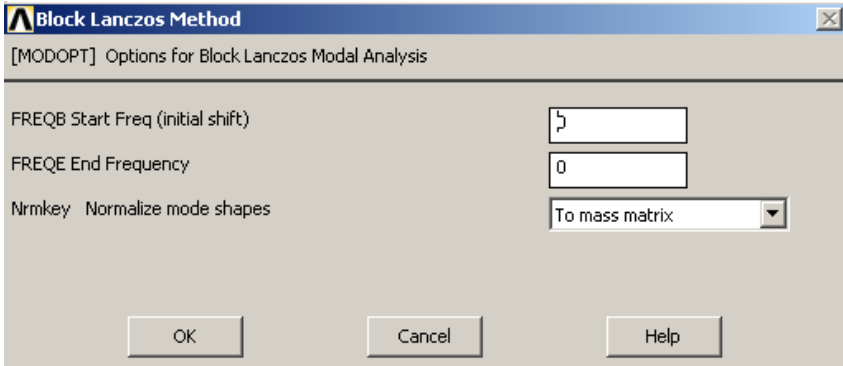


Рисунок 4.17 –Завдання параметрів для виконання модального аналізу

Виконання розрахунку викликається такою послідовністю
Main Menu>Solution> Solve> Current LS

Після цього на екрані з'являться дві панелі: інформаційна STATUS Command та діалогова Solve Current Load Step.

Після ознайомлення з першою панеллю, вона закривається. Натискання кнопки OK в панелі Solve Current Load Step викликає процедуру розрахунку по закінченню якого з'явиться повідомлення Solution is done.

4.5 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен включати:

Геометричну (3D) модель деталі (шпинделя);

Накладені на деталь навантаження;

Розрахунок температурного поля деталі (шпинделя) (тепловий аналіз);

Розрахунок температурних деформацій шпинделя від накладеного температурного поля (структурний аналіз);

Розрахунок частот власних коливань шпинделя (модальний аналіз).

4.6 Контрольні питання

1. Які задачі можуть вирішуватися за допомогою комплексу ANSYS?

2. Які властивості матеріалів слід задавати для розв'язання теплової задачі? проведення структурного аналізу?

3. Які види навантаження слід задавати для розв'язання теплової задачі? проведення структурного аналізу?
4. Які типи елементів можуть використовуватися для розв'язання теплової задачі?
5. Як здійснюється вибір типу задачі в комплексі ANSYS.
6. З якою метою проводиться модальний аналіз?

4.7 Рекомендована література

1. Солоха В.В. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “Дослідження та випробування механічних систем” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування” за освітньою програмою “Металорізальні верстати та системи” /Укл. В.В. Солоха. - Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2025. - 122 с.
2. Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L. The Finite Element Method. First edition. V. 1: The Basis/ Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000. – 708 p.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ СТИКІВ ДЕТАЛЕЙ ВЕРСТАТІВ

5.1 Мета роботи

Метою роботи є ознайомлення з методикою і засобами дослідження теплопровідності контакту деталей та вузлів металорізальних верстатів.

5.2 Зміст роботи

- з'ясувати вплив величини теплового опору контакту на результати розрахунків теплового стану верстатів;
- вивчити чинники, що впливають на теплопровідність контакту деталей;
- виконати вимірювання і розрахувати теплопровідність контакту;
- визначити вплив різних чинників на величину теплопровідності контакту.

5.3 Обладнання та інструмент

- устаткування для визначення теплопровідності стиків;
- дослідні зразки;
- термопари;
- динамометр;
- цифровий комбінований прилад Щ-301.

5.4 Теплопровідність зони контакту сполучених поверхонь

Теплообмін між елементами конструкції верстата відбувається через стики поверхонь деталей, які чинять опір передачі тепла від більш нагрітих деталей до менш нагрітих. Величина теплового опору стиків буде визначати інтенсивність теплообміну між елементами конструкції верстата і, як наслідок, характер теплового поля елементів конструкції і теплових деформацій цих елементів. Тепловий опір стиків обумовлюється недосконалістю поверхонь, профіль яких відрізняється від ідеального внаслідок наявності на реальних поверхнях макро- і мікронерівностей. Такі поверхні контактуватимуть виступами мікронерівностей і реальна площа контакту складатиме дуже малу частку від номінальної. Тепловий опір контакту виникає внаслідок стягування ліній теплового потоку до місць реального контакту. За наявності макровідхилень на контактуючих поверхнях це стягування

буде подвійним: до місць макроконтакту і в місцях макроконтакту до місць контактування мікрОВиступів.

Тепло в зоні контакту передається через прошарок середовища, що заповнює міжззорний простір і через місця фактичного контакту, доля променевого теплообміну незначна, виходячи з того що температури в стиках верстатних вузлів невисокі. Теплопровідність контакту α_c можна записати:

$$\alpha_c = \alpha_{сер} + \alpha_m \quad (5.1)$$

де $\alpha_{сер}$ - теплопровідність середовища;

α_m - теплопровідність місць фактичного (металевого) контакту.

Теплопровідність середовища, що заповнює міжззорний простір розраховується

$$\alpha_{сер} = \frac{\lambda_{сер}}{\delta_{сер}}, \quad (5.2)$$

де $\lambda_{сер}$ - коефіцієнт теплопровідності речовини, що заповнює міжззорний простір;

$\delta_{сер}$ - ефективна товщина проміжного прошарку середовища.

Теплопровідність фактичного (металевого) контакту виражається залежністю

$$\alpha_m = \frac{2a_m \cdot \lambda_m \cdot n}{\psi \cdot A_a}, \quad (5.3)$$

де a_m - радіус одиночної плями контакту;

$\lambda_m = \frac{2\lambda_{m1} \cdot \lambda_{m2}}{\lambda_{m1} + \lambda_{m2}}$ - зведений коефіцієнт теплопровідності

контактуючих матеріалів, λ_{m1} λ_{m2} - теплопровідності одного і іншого матеріалів контактної пари, відповідно;

n - число одиночних плям контакту на номінальній площі,

$$n = \frac{A_r}{\pi \cdot a_m^2},$$

A_r - фактична площа контакту;

ψ - коефіцієнт стягування ліній теплового потоку, який враховує звуження прохідного перерізу для теплового потоку біля поверхні контакту. Оскільки відносна фактична площа контакту не перевищує декількох відсотків, значення коефіцієнта ψ близьке до одиниці

A_a - номінальна площа контакту.

Середній радіус плями контакту можна апроксимувати ступеневою залежністю

$$a = 0.77 \cdot \left(\frac{\sigma}{m}\right) \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0.097}, \quad (5.4)$$

де $\sigma \approx \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ - сумарний середньоквадратичний рівень шорсткості поверхонь контакту;

$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}$ - сумарний середній абсолютний ухил мікронерівностей поверхонь контакту.

P – тиск на контактї;

H – твердість поверхні контакту.

Розрахунок середнього радіусу плями контакту в діапазоні тиску $0,38 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ - $50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ за формулою (5.4) дає величину середнього радіусу в межах від 3 мкм до 8 мкм.

Теплопровідність металевого контакту зручно подати в безрозмірному вигляді, що дає можливість аналізувати теплопровідність контактів з різних матеріалів і з різною якістю обробленої поверхні:

$$\frac{\alpha_m}{\lambda} \cdot \frac{\sigma}{m} = c \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^n, \quad (5.5)$$

де σ - сумарний середньоквадратичний рівень шорсткості;

c і n – постійні коефіцієнт і показник ступеню.

Наявність на поверхнях контакту хвилястості та макровідхилень може суттєво вплинути на тепловий опір контакту.

Теплопровідність зони контакту значною мірою залежить від тиску на поверхні контакту, геометрії поверхонь і речовини, що заповнює міжзорний простір. Експерименти з сухими стиками, міжзорний простір яких заповнений повітрям, і мащеними (в зазорі мінеральне масло И-20А), показують значний вплив середовища на теплопровідність контакту.

Теплопровідність мащених стиків в умовах початкового навантаження практично не залежить від тиску на контактї в межах прийнятих величин. Сталість теплопровідності контакту в мащених стиках зі зміною тиску свідчить про те, що в стиках відсутній безпосередній металевий контакт.

В сухих стиках теплопровідність контакту визначається теплопровідністю середовища і металевого контакту і залежить від

тиску на контакті.

Як для сухих, так і для змащених стиків теплопровідність середовища контакту визначається мікро і макровідхиленнями поверхонь контакту.

Виходячи з формули (5.5) можна вважати, що за умови, коли $P/HV = 0$ теплопровідність металевго контакту $\alpha_m = 0$ і тепло через стики передається лише за рахунок прошарку середовища. Отже є припустимим вважати, що для $P/HV = 0$, $\alpha_c = \alpha_{сep}$.

5.5 Методика експериментального визначення теплопровідності стиків

Найбільш простим і надійним методом експериментального визначення температурного опору контакту є метод стаціонарного теплового потоку. Основа методу полягає в тому, що розглядається тепловий потік, який проходить через стрижень в аксіальному напрямку. Якщо з одного боку стрижня розмістити джерело нагріву, а з іншого стік тепла і ретельно ізолювати бічні стінки, то температурний градієнт за довжиною циліндра буде сталим. Якщо цей стрижень буде складеним з частин, то і градієнт в кожній частині буде сталим, але на стику утвориться температурний стрибок. Величина цього стрибка буде залежати від температурного опору контакту.

За законом Фур'є

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{dx}, \text{ Вт} \quad (5.6)$$

Записавши вираз для теплового потоку за допомогою формули Ньютона - Ріхмана і порівнявши обидва вирази, отримаємо

$$\alpha_k \Delta T F = -\lambda F \frac{dT}{dx}, \quad (5.7)$$

де ΔT - температурний перепад в зоні контакту, К;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

F – площа, через яку передається тепло, м²;

α_k – коефіцієнт теплопровідності контакту, Вт/(м²·К).

Теплопровідність контакту запишеться в вигляді

$$\alpha_k = \frac{\lambda \frac{dT}{dx}}{-\Delta T}, \text{ Вт/(м}^2\text{·К)} \quad (5.8)$$

Для визначення величини теплопровідності контакту необхідно знати тепловий потік, що протікає через контактну зону. Цей потік

можна визначити градієнтами температур на верхньому і нижньому зразках.

Із рівняння Фур'є тепловий потік визначиться:

$$q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\Delta l_{1-2}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (5.9)$$

де T_1, T_2 - температура в точках замірів на зразках;

Δl_{1-2} - відстань між точками замірів температур.

Для підвищення точності слід вимірювати тепловий потік в обох зразках і використовувати середнє арифметичне значення цих величин.

Теплопровідність контакту можна визначити за такою залежністю

$$\alpha_k = \frac{q}{\Delta T_k} = \frac{q_1 + q_2}{2\Delta T_k}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \quad (5.10)$$

де ΔT_k - перепад температур на контакті, К (°С) (рис. 5.1);

q_1, q_2 - теплові потоки в 1 і 2 зразках, відповідно, Вт/м².

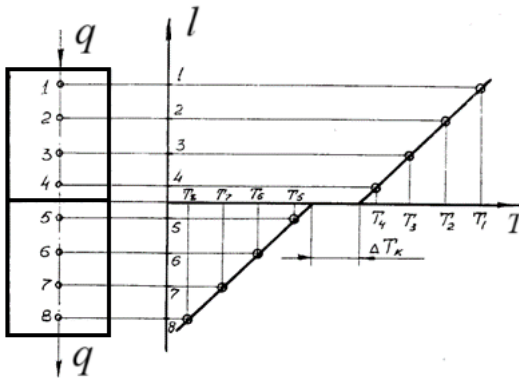


Рисунок 5.1 – Схема визначення перепаду температур на контакті

В разі незначних перепадів температур в зразках залежність теплопровідності матеріалу від температури можна не враховувати і вважати коефіцієнт теплопровідності λ сталим.

Дослідження теплопровідності контакту проводиться на спеціальній установці (рис. 5.2). Дослідні зразки 4 і 5, з владнаними на однаковій відстані вздовж осі термопарами, встановлювались між джерелом тепла (нагрівачем) 3 і стоком тепла (холодильником) 9. Термопари доцільно використовувати з високою термоЕРС з діаметром

дроту термоелектродів 0,2 – 0,3 мм з тим, щоб зменшити викривлення теплового потоку в зразках, внаслідок установа термодатчиків. Для усунення радіальних потоків тепла, бічні поверхні зразків ретельно ізолюються матеріалом з низькою теплопровідністю 6, 7, 8. Навантаження на контакті створюється через нагрівач і пружинний динамометр 2 від гвинтового преса 1. Показання термодатчиків реєструються цифровим комбінованим приладом Щ-301 поз. 11.

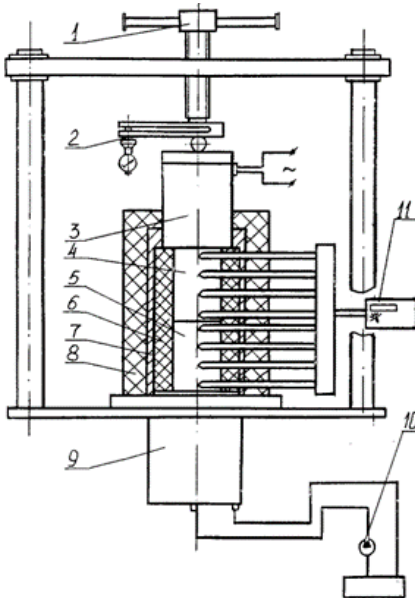


Рисунок 5.2 – Установка для дослідження теплопровідності контакту

В експерименті досліджується вплив на теплопровідність контакту мікро і макрогеометрії поверхонь контакту, навантаження на контакті, теплопровідності матеріалів контактуючих пар, твердості поверхонь контакту. Температура на контакті береться близькою до реальних температур в верстатних стиках, в межах $40^{\circ} - 50^{\circ}\text{C}$ ($313\text{K} - 323\text{K}$). Діапазон навантажень на контакті доцільно змінювати від мінімального навантаження від маси нагрівача до $50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Цей діапазон охоплює реальні величини навантажень в стиках верстатних вузлів, які рекомендують затягувати так, щоб тиск на контакті складав $20 \cdot 10^5 - 25 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Матеріал зразків вибирається характерний для верстатних деталей: сірий чавун СЧ-30 і СЧ-15; сталі 40Х і 20Х. Поверхні контакту зразків одержані шліфуванням з параметром шорсткості R_z в межах від 1 мкм до 14 мкм. Зразки виконані в формі паралелепіпеда з висотою 50 мм і площею основи 30×40 мм. Такі розміри поверхні контакту достатні для того, щоб на теплопровідність почали впливати відхилення форми поверхонь.

В кожному зразку владнувалося по 4 термопари з однаковою відстанню між ними. 4 і 5 термопари розміщені на відстані 5 мм від площини контакту, так само, як і 1 та 8 термопари від торця зразка.

Характеристики зразків і поверхонь контакту наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 3.2.- Характеристика зразків і їх поверхонь.

Номер серії	Матеріал зразка	Коефіцієнт теплопров., Вт/(м·К)	Параметри поверхні		
			R_z , мкм	Макровідхилення, мкм	Твердість HV, МПа
1	Сталь 40Х Сталь 40Х	46	14,2 12		368 384
2	Чавун СЧ15 Чавун СЧ15	50,2	4,45 4,95	7,5 6	158 154
3	Чавун СЧ30 Чавун СЧ30	50,2	3,4 2,8	1,8 4,0	208 195
4	Сталь 20Х Сталь 20Х	39	2,48 4,08	3,6 6,4	421 349
5	Сталь 20Х Сталь 20Х	39	1,0 1,0	2,6 4,4	214 732
6	Сталь 20Х Чавун СЧ30	39 50,2	1,0 3,4	4,4 1,8	732 208

5.6 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з принципами визначення теплопровідності зони контакту.

2. Підготувати обладнання для дослідження теплопровідності контакту. Термопари повинні бути надійно закріплені в зразках. Одним із варіантів такого закріплення може бути конденсаторне зварювання. Термопара повинна установлюватися в зразках таким чином, щоб місце спаю було посередині зразка.

Зразки слід ретельно ізолювати з бічних сторін, щоб усунути тепловідведення з бічних поверхонь і забезпечити передачу тепла

тільки в аксіальному напрямку.

Підключити нагрівач і систему охолодження.

3. Зафіксувати покази усіх термопар (від 1 до 8). Знімати покази температур слід після їх стабілізації, тобто після виходу в стаціонарний тепловий режим. Досліди проводити за різних значень тиску на контакті: від ненавантаженого контакту до значення відносного тиску $P/H = 21 \cdot 10^{-4}$: P – тиск на поверхні контакту, H – менше значення твердості поверхонь контакту. Кожен дослід повторити від 3 до 5 разів. За результатами повторних дослідів визначити середнє значення температури в кожній точці. Результати подати в таблиці.

Таблиця 3.3 – Середні значення температури в точках зразків

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
Навантаж.								
F_1								
F_2								
F_3								
F_4								
F_5								
F_6								
F_7								
F_8								

4. За формулою 5.9 визначити тепловий потів q в зразках. Для більшої точності доцільно брати температури в крайніх точках зразків.

5. За середніми значеннями температур побудувати графіки розподілу температур в зразках (рис. 5.2) і визначити перепад температур на контакті ΔT_k .

6. За отриманим значенням теплового потоку q і перепаду температур на контакті ΔT_k за формулою 5.10 визначити теплопровідність контакту α_k . Теплопровідність контакту α_k визначити для усіх дослідів з різними значеннями відносного тиску на контакті P/H .

7. Побудувати залежність $\alpha_k(P/H)$ на координатній площині $P/H - \alpha_k$ і знайти рівняння, що описує залежність теплопровідності контакту від відносного тиску (рівняння регресії). Використання можливостей Excel може суттєво спростити отримання такого рівняння.

8. Зробити висновки по роботі, щодо впливу навантаження на

величини теплопровідності контакту.

5.7 Зміст звіту

Звіт за лабораторною роботою повинен містити:

1. Схему установки для дослідження теплопровідності контакту.
2. Схему визначення перепаду температур на контакті.
3. За результатами дослідів (додаток А) у відповідності до варіанту, визначити середні значення температур в точках.
4. Таблицю результатів експерименту.
5. Розрахунки теплових потоків, перепадів температур на контакті і теплопровідності контакту для різних умов навантаження.
6. Графік залежності $\alpha_k(P/H)$ на координатній площині $P/H - \alpha_k$.
7. Висновки щодо залежності теплопровідності контакту від різних чинників.

5.8 Контрольні питання

1. Навіщо потрібно знати значення теплопровідності стиків деталей верстатів?
2. Які складові теплового опору контакту деталей верстатів?
3. Що впливає на теплопровідність середовища в контакті?
4. Які чинники впливають на теплопровідність металевого контакту?
5. Як здійснюється дослідження теплопровідності контакту?
6. Як впливає на теплопровідність стику наявність мастильного матеріалу на контакті?
7. Який вплив на тепловий опір контакту чинить наявність на поверхнях контакту макровідхилень?

5.9 Рекомендована література

1. Солоха В. В., Ковтун Е. Г., Дядя С. И. Вплив геометрії поверхонь на теплопровідність контакту. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. –1997, №1. – с. 78-80.
2. Солоха В. В., Внуков Ю.М. Теплопровідність стиків базових деталей верстатів. Праці міжнародної науково-технічної конференції “Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва”. К.: НТУУ “КПІ”, 1998, т. 1.-с. 115-119.

Додаток А

Таблиця А1 – Результати досліджень для пари контракту 2.
Температури в точках зразків.

№ точки Наван. т. F	1	2	3	4	5	6	7	8
0	55,7; 54,3; 55,1	50,6; 49,3; 49,8	45; 45,4; 44,8	40,5; 40,1; 39,6	30,2; 30,8; 29,6	25,2; 25,7; 24,6	20; 19,5; 20,6	15,1; 15,7; 14,8
55,4 (3)	60; 60,4; 59,7	55,1;5 5,6; 54,4	45,2; 44,5; 45,6	40,2; 40,6; 39,4	31; 30,6; 31,5	26; 26,6; 25,5	21,1; 20,5; 21,6	16; 16,7; 15,6
111 (6)	60,1; 59,5; 60,6	55; 54,6; 55,7	50,2; 50,7; 49,4	45,5; 45; 44,6	36,6; 37,4;3 7,1	32,5; 31,9; 31,6	27,7; 27,1; 26,3	21,3; 22,6; 22,2
166 (9)	59,8; 59,5; 60,6	54,5; 55; 55,4	50,1; 5,4; 49,6	45,6; 45,1; 44,5	36,8; 37,4; 36,5	31,9; 32,4; 31,6	26,9; 26,5; 27,4	21,9; 21,4; 22,5
222 (12)	58,5;5 8; 57,7	52,4; 52,9; 53,6	48,7; 48,1; 47,4	42,5; 43,1; 43,5	36,2; 35,7; 35,3	31,3; 30,7; 30,2	25,2; 25,6; 26,0	21,2; 20,6; 20,1
286 (15)	55,4; 56,1; 56,5	50,4; 51,2; 51,4	46,6; 46,2; 45,4	41,5; 41,1; 40,6	34,4; 33,9; 33,6	29,5; 29,1; 28,5	24,4; 23,9; 23,7	19,3; 18,9; 18,5
333 (18)	53,7; 52,9;5 2,6	47,4; 48,2; 48,5	43,6; 43,1; 42,5	37,8; 38; 38,3	31,6; 32,5; 32,9	26,4; 25,8; 26,1	20,5; 20,8; 21,6	16,5; 15,9; 15,7
388 (21)	56,8; 56,9; 57,4	52,6; 52,1; 51,4	47,5; 47; 46,8	41,8; 41,7; 42,5	35,3; 35,8; 34,8	30,3; 29,8; 30,6	25,2; 25,7;2 4,8	20,8; 20,3; 19,7

Додаток А

Таблиця А2 – Результати досліджень для пари контракту 3.
Температури в точках зразків.

№ точки Навант. F	1	2	3	4	5	6	7	8
0	64; 63,5; 63,1	57,5; 57,2; 58,1	51,5; 51,2; 50,8	44,7; 45; 45,4	34,8; 35,2; 35,7	28,6; 29,1; 29,5	23,3; 22,8; 22,4	17; 16,7; 16,2
75 (3)	61; 60,6; 60,2	54,8; 54,4; 50	47,8; 48,2; 48,6	41,5; 42; 42,4	35,8; 36,2; 36,6	30,4; 30,1; 29,7	24,1; 23,8; 23,4	17,2; 17,6; 18,1
150 (6)	62; 61,6; 61,1	55; 55,4; 55,9	49,7; 49,2; 48,8	42,6; 43,1; 43,3	35,1; 34,7; 34,3	28,9; 28,5; 28,2	21,8; 22,2; 22,6	16,5; 16,1; 15,7
224 (9)	61,1; 61,5; 60,8	54,4; 55,3; 54,9	48,7; 48,3; 49,1	42,8; 42,5; 42,1	33,9; 34,7; 34,3	28,1; 28,6; 27,8	21,4; 21,9; 22,3	16,1; 15,7; 15,4
300 (12)	63,3; 62,9; 62,6	56,2; 57,1; 56,7	50,5; 50,2; 50,8	44,8; 44,3; 43,9	35,8; 36,7; 36,2	30,1; 30,4; 29,7	24,2; 23,5; 23,8	17,9; 19,2; 17,6
374 (15)	64; 63,7; 64,4	58,2; 57,4; 57,8	51,2; 51,9; 51,6	45; 45,9; 45,4	37,1; 37,7; 37,4	31,6; 31,2; 30,9	25; 24,6; 25,3	19,2; 18,8; 18,4
449 (18)	62,9; 63,6; 63,2	57,4; 57; 56,7	50,8; 50,4; 51,3	45; 44,2; 44,6	36,3; 37,1; 36,7	30,5; 30,2; 30,9	24,3; 24,8; 23,9	18,4; 18,1; 18,7
524 (21)	64,2; 64,7; 63,8	57,7; 58; 58,4	52,2; 51,5; 51,8	45,2; 45,9; 45,6	37,7; 37,4; 38	31,1; 31,54 31,9	25; 25,8; 25,3	18,8; 19,6; 19,1

Додаток А

Таблиця А3 – Результати досліджень для пари контракту 4.
Температури в точках зразків.

<i>№ точк и</i> <i>Наван т. F</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>0</i>	64,7; 64,3; 65,1	59,5; 58,7; 59,1	53,1; 53,6; 54	48; 48,4; 47,7	37,1; 37,5; 36,8	31,9; 31,5; 31,1	25,6; 26; 26,5	19,8; 20,3;2 0,8
<i>126 (3)</i>	61,1; 60,7; 61,5	55,9; 55,5; 55,1	50; 50,5; 49,6	46,1; 46,8; 46,5	36,3; 36,8; 35,9	31,1; 30,3; 30,8	24,8; 25,2; 25,7	20; 19,2; 19,6
<i>252 (6)</i>	65,1; 64,8; 65,5	59,1; 59,5; 60	54; 53,6; 54,5	48; 48,4; 48,9	38,1; 38,9; 38,5	32,5; 32,9; 33,4	27,0; 27,4; 27,8	22,4; 21,3; 21,8
<i>377 (9)</i>	62,2; 61,7; 62,6	57; 56,1; 56,6	50,5; 51,0;5 1,6	45,5; 45,1; 46	35,1; 35,9; 35,6	29,5; 29,9; 30,5	24,0; 24,8; 24,4	18,9; 18,4; 19,3
<i>504 (12)</i>	64,3; 63,8; 64,1	58,4; 57,9; 58,8	53,3; 52,4; 52,9	47,3; 46,8; 47,7	38,4; 37,5; 37,9	31,8; 32,3; 32,7	26,7; 26,2; 27,1	20,8; 21,6; 21,2
<i>628 (15)</i>	62,5; 62,9; 62,1	56,9; 57,3; 56,5	50; 51,9; 51,4	46,2; 45,4; 45,8	36,3; 37,2; 36,8	30,8; 31,2; 31,7	26; 25,1; 25,6	19,7; 20,6; 20,1
<i>754 (18)</i>	63,1; 63,8; 63,5	57,5; 58,4; 57,9	53,8;5 1,9; 52,4	46,8; 46,3;4 7,2	38; 37,6; 38,5	32; 32,9;3 2,4	26,5; 27,3; 26,8	20,8;2 1,7; 21,3

Додаток А

Таблиця А4 – Результати досліджень для пари контракту 5.
Температури в точках зразків.

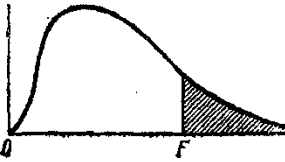
<i>№ точки</i> <i>Навант. F</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>0</i>	82,1; 82,5; 82,8	74; 73,2; 73,6	64,3; 65,2; 64,8	55,6; 56; 56,4	44,7; 44,2;4 6,3	35,4; 36,3; 35,9	26,6; 27,1; 27,5	18,8; 17,7; 18,3
<i>77 (3)</i>	80,4; 80,8; 79,9	71,2; 71,9; 71,6	62,4; 62,8; 63,3	54,5; 54; 53,6	43,2; 44,1; 43,7	34,8; 34,4; 35,2	26; 26,5; 25,6	17,8; 16,7;1 7,2
<i>154 (6)</i>	81,2; 81,6; 82,1	72,3; 72,8; 73,2	64,4; 64; 63,7	55,2; 55,8; 54,8	45,7; 45,2;4 4,8	36,9; 36,8; 36,4	27,9; 27,1; 27,5	18,3; 18,7; 19,1
<i>225 (9)</i>	81,4; 80,7; 81,0	72,2; 72,7; 71,8	63,9; 63,4; 63	54,8; 55,1; 54,6	45,8; 45,2; 44,8	36; 36,4; 36,9	27,5; 27,1; 28	18; 18,5; 17,6
<i>307 (12)</i>	78,9; 79,4; 79,8	70,2; 70,6; 70,9	61,4; 62,3; 61,8	53,5; 52,6; 53	43,8; 42,9;4 3,4	34,5; 34,9; 34,1	25,3; 25,7; 26,2	16,4; 17,3; 16,9
<i>385 (15)</i>	82,4; 81,5; 82	73,2; 73,7; 72,8	64; 64,4; 64,9	55,2; 56,1; 55,6	45,8; 46,3; 46,9	37,5; 37,9; 37	28,2; 28,7; 29,1	19,9; 19,5; 20,4
<i>462 (18)</i>	78,8; 78; 78,4	69,3; 69,6; 70,1	60,8; 60,2; 61,3	52,5; 52; 51,6	42,2; 42,6; 43,1	34,3; 33,8; 33,2	24,6; 25; 25,5	15,7; 16,6; 16,2
<i>539 (21)</i>	80,3; 79,8; 79,4	70,6; 71,5; 71	62,7; 62,2; 61,8	53,4; 53,9; 52,8	43,6; 44,0; 44,6	35,7; 35,2; 34,8	26,4; 25,9; 26,8	17,6; 17,2; 18,0

Додаток А

Таблиця А5 – Результати досліджень для пари контракту 6.
Температури в точках зразків.

№ точки Навант F	1	2	3	4	5	6	7	8
0	68,2; 68,7; 67,8	62,3; 62,8; 63,2	57,9; 57,4; 57,0	51,6; 52,5; 52,0	42,8; 42,3; 41,9	34,8; 35,7; 35,3	26,7; 26,3; 25,8	20,9; 21,8; 21,3
75 (3)	69,7; 69,2; 68,8	64,2; 63,3; 63,8	58,0; 58,4; 58,9	52,5; 53,0; 53,6	44,3; 44,7; 45,2	38,3; 37,7; 37,2	31,2; 30,8; 30,3	24,3; 23,7; 23,2
153 (6)	67,9; 67,4; 66,8	61,6; 62,0; 62,5	56,6; 56,2; 57,1	51,7; 50,8; 51,2	43,7; 44,1; 43,2	36,7; 37,2; 36,3	30,1; 29,7; 29,3	22,2; 22,7; 23,1
225 (9)	64,3; 64,8; 65,2	59,0; 59,4; 59,8	54,5; 53,6; 54,0	48,2; 48,6; 49,1	41,8; 41,2; 40,7	34,3; 34,8; 33,9	27,3; 27,9; 26,6	19,7; 20,3; 20,9
305 (12)	63,2; 63,8; 62,7	58,4; 57,8; 57,3	52,4; 53,0; 51,8	47,6; 47; 46,6	40,3; 39,8; 39,2	32,2; 32,8; 33,3	25,2; 25,8; 26,3	18,4; 18,8; 19,3
374 (15)	66,1; 65,5;6 5,1	60,5; 60,1; 59,6	54,1; 54,7; 55,3	49,9; 49,3;4 8,7	41,6; 42,3; 42,9	35,3; 35,8; 34,7	28,8; 28,3; 27,7	21,9; 21,3;2 0,6
449 (18)	65,0; 64,4; 63,9	59,6; 59,0; 58,3	53,6; 54,0; 53,1	48,8; 48,2; 47,6	40,5; 41,2; 41,8	33,7; 34,2; 34,8	27,7; 27,2; 26,6	20,7; 20,2; 19,6
524 (21)	64,3; 63,8; 63,2	58,9; 58,4; 57,8	52,4; 53,0; 53,5	48,1; 47,6; 47,2	41,3; 40,8; 40,2	33,8; 33,1; 34,3	26,3; 26,8; 27,4	20,4; 19,8; 19,3

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 - F-розподіл (розподіл v^2)

В таблиці наведені значення квантилів $v_{1-\alpha}^2$ (m , m')

для $\alpha = 0,05$ (звичайний шрифт) и $\alpha = 0,01$ (жирний **шрифт**) в залежності від числа ступенів свободи m **и** m' .

m - число ступенів свободи для більшої дисперсії

m' — число ступенів свободи для меншої дисперсії

Число ступенів свободи для більшої дисперсії									
$m' \backslash m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	18,51 98,49	19,00 99,00	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,36 99,34	19,37 99,36	19,38 99,38
3	10,13 34,12	9,55 30,82	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,88 27,67	8,84 37,49	8,81 27,34
4	1,71 21,20	6,94 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,21	6,09 14,98	6,04 14,80	6,00 14,66
5	6,61 16,26	5,79 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,88 10,45	4,82 10,27	4,78 10,15
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,78	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,21 8,26	4,15 8,10	4,10 7,98
7	5,59 12,25	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,97 7,46	3,87 7,19	3,79 7,00	3,73 6,84	3,68 6,71
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,50 6,19	3,44 6,03	3,39 5,91
9	5,12 10,56	4,26 8,02	3,86 6,99	3,63 6,42	3,48 6,06	3,37 5,80	3,29 5,62	3,23 5,47	3,18 5,35
10	4,96 10,04	4,10 7,56	3,71 6,55	3,48 5,99	3,33 5,64	3,22 5,39	3,14 5,21	3,07 5,06	3,02 4,95
11	4,84 9,65	3,98 7,20	3,59 6,22	3,36 5,67	3,20 5,32	3,09 5,07	3,01 4,88	2,95 4,74	2,90 4,63
12	4,75 9,33	3,88 6,93	3,49 5,95	3,26 5,41	3,11 5,06	3,00 4,82	2,92 4,65	2,85 4,50	2,80 4,39
13	4,67 9,07	3,80 6,70	3,41 5,74	3,18 5,20	3,02 4,86	2,92 4,62	2,84 4,44	2,77 4,30	2,72 4,19

Додаток В

Таблиця В.1 - t – розподіл Стьюдента

В таблиці наведені значення квантилів $|t(m)|_{1-\alpha}$ в залежності від числа ступенів свободи m та імовірності α

Імовірність $P\{ t > t(m) _{1-\alpha}\}$								
$\alpha \backslash m$	0,80	0,40	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,325	1,376	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,6
2	0,289	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,277	0,978	1,638	2353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,271	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,267	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,265	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	6,959
7	0,263	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	0,262	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,261	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,260	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,260	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,259	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,259	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,258	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,258	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,258	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,257	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,257	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,257	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,257	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Номінальна статична характеристика термопари хромель-копель (ХК)

Температура робочого спаю, °C	ТермоЕРС, мВ, для температури									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,381	0,445	0,509	0,574
10	0,638	0,702	0,767	0,832	0,896	0,961	1,026	1,091	1,157	1,222
20	1,287	1,353	1,418	1,484	1,550	1,516	1,682	1,748	1,825	1,881
30	1,947	2,014	2,081	2,148	2,214	2,282	2,349	2,416	2,483	2,551
40	2,618	2,686	2,753	2,821	2,889	2,967	3,025	3,094	3,162	3,230
50	3,299	3,367	3,436	3,505	3,574	3,643	3,712	3,781	3,850	3,920
60	3,989	4,059	4,128	4,198	4,268	4,338	4,408	4,478	4,548	4,619
70	4,689	4,760	4,830	4,901	4,972	5,042	5,113	5,184	5,255	5,327
80	5,398	5,469	5,541	5,612	5,684	5,756	5,828	5,899	5,971	6,043
90	6,116	6,188	6,260	6,333	6,405	6,478	6,550	6,623	6,696	6,769

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Номінальна статична характеристика термопар хромель-алюмель (ХА)

Температура, робочого спаю,	ТермоЕРС, мВ, для температури,									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,394	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639