

Процеси різання та обробка результатів експериментів

Практичне заняття 1. Короткі теоретичні відомості про сили різання

1. Загальні відомості: аналіз сил, що діють на лезо інструмента

У процесі різання до різального інструмента додаються певні зусилля, за допомогою яких він впливає на зрізуваний шар. Величина цих сил залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів, геометричних параметрів інструмента, елементів режиму різання складу мастильно-охолодного технологічного середовища (МОТС) і інших факторів. Значення величин і напрямлення сил різання необхідно знати для розрахунку потужності привода головного руху, міцності та жорсткості окремих вузлів верстата й різального інструмента, зусиль закріплення заготовки та пристосувань, точності обробки та ін.

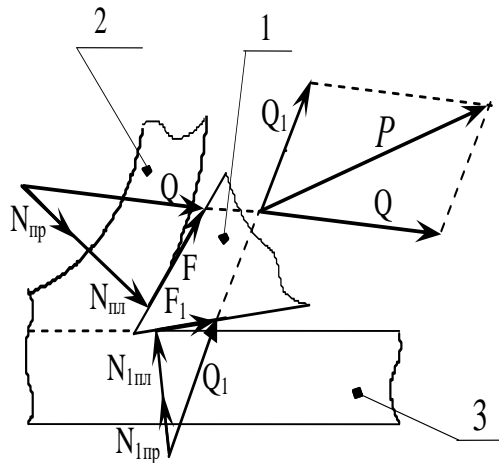


Рисунок 1 - Схема сил, що діють на різальний клин (лезо) інструмента

У загальному випадку на різальний клин (лезо) 1 (рис. 1) з боку зрізуваного шару на передню поверхню діє сила нормального тиску $\bar{N} = \bar{N}_{пр} + \bar{N}_{пл}$, затрачувана на пружну $N_{пр}$ й пластичну $N_{пл}$ деформації оброблюваного матеріалу. У той самий час на задню поверхню леза поблизу різальної кромки, в результаті пружної післядії (відновлення) оброблюваного матеріалу в зоні контакту леза з поверхнею різання також діє сила нормального тиску $\bar{N}_1 = \bar{N}_{1пр} + \bar{N}_{1пл}$.

При переміщенні леза щодо стружки й поверхні різання (на заготовці 2) на робочих ділянках передньої та задньої поверхонь леза інструмента виникають сили тертя: на передній – $F = \mu(N_{пр} + N_{пл})$, а задній – $F_1 = \mu_1(N_{1пр} + N_{1пл})$, де μ і μ_1 – середні коефіцієнти тертя на передній і задній поверхнях відповідно.

Примітка. Основний вплив на величини сил, що діють на задню поверхню леза, надають пружно – пластичні властивості оброблюваного матеріалу, величина заднього кута α і ширина зрізуваного шару. Крім того, на них істотний вплив може робити величина площадки зношування, що утворюється в процесі різання. Наприклад, чим більша межа пружності оброблюваного матеріалу, тим більше сили N_1 і F_1 . Збільшення довжини головної різальної кромки, викликане збільшенням ширини зрізуваного шару і площадки зношування, приводить до практично пропорційного зростання сил на задній поверхні.

У результаті додавання сил, що діють на передню ($\bar{N}_{пр} + \bar{N}_{пл} + \bar{F} = \bar{Q}$) і задню ($\bar{N}_{1пр} + \bar{N}_{1пл} + \bar{F}_1 = \bar{Q}_1$) поверхні, утворюється рівнодійна сила $\bar{P} = \bar{Q} + \bar{Q}_1$, яку називають силою різання.

Теоретичні рівняння, які використовують для визначення сил, що діють на передній і задній поверхнях інструмента, складні й, головне, не зовсім точні, тому що засновані на ряді гіпотез і містять коефіцієнти, що характеризують властивості оброблюваного металу, які в

більшості випадків невідомі і їх потрібно визначати, як правило, експериментально. Так, наприклад, за дослідженнями В.Д. Кузнецова й В.А. Кривоухова, з деякими допущеннями нормальну силу N можна визначати за формулою

$$N = \sigma_0 t S k^{m_c}, \quad (0.1)$$

де σ_0 - границя текучості оброблюваного матеріалу при його стисненні, МПа;

t - глибина різання, мм;

S - подача, мм/об;

k - коефіцієнт усадки стружки;

m_c - показник політропи стиснення оброблюваного матеріалу.

Ця формула отримана на основі зіставлення процесів пластичного стиснення й утворення стружки.

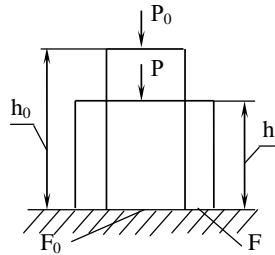


Рисунок 2 - Пластичне стиснення зразка

Як відомо, залежність стискуючої сили P і висоти стисливого зразка h при пластичному стисненні має вигляд:

$$P h^{m_c} = const \quad (0.2)$$

Ця залежність одержала назву політропічної, а показник ступеня m_c - показника політропи.

Відповідно до (0.2) можна записати

$$P h^{m_c} = P_0 h_0^{m_c}, \quad (0.3)$$

де P_0 - сила, що відповідає умовній границі текучості σ_0 деформованого матеріалу;

h_0 - висота зразка на початку пластичного деформування.

Примітка. σ_0 - напруження при $h_0/h=1$, починаючи з якого з'являються перші залишкові деформації, якщо політропічна залежність має місце із самого початку пластичної деформації.

Якщо взяти $P_0 = \sigma_0 F_0$, де F_0 - площа поперечного перерізу зразка на початку його пластичного деформування, із (0.3) можна записати

$$P = P_0 \left(\frac{h_0}{h}\right)^{m_c} = F_0 \sigma_0 \left(\frac{h_0}{h}\right)^{m_c}. \quad (0.4)$$

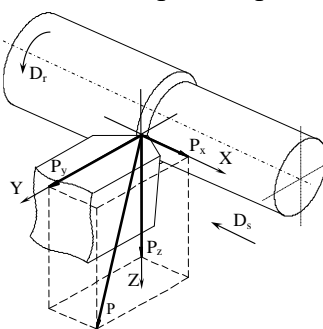
Стосовно процесу стружкоутворення візьмемо $P=N$, $F_0=a \cdot b=t \cdot S$ і $h_0/h=k$, де a й b товщина та ширина зрізу відповідно; k - коефіцієнт усадки стружки. У результаті підстановки цих величин у формулу (0.4) одержимо вищевказану формулу (0.1).

Наведений приклад теоретичного визначення нормальної сили N показує всю складність проведених розрахунків, тому що в загальному випадку для визначення сил різання необхідно знати характеристики пластичного деформування оброблюваного матеріалу, параметри перетину зрізу, коефіцієнти тертя та усадки стружки при різних значеннях кутів леза інструмента. Складність і неточність теоретичних розрахунків полягає в тому, що, наприклад, коефіцієнт усадки стружки сам по собі залежить від ряду факторів і істотно впливає на сили різання. До того ж при теоретичному визначенні характеристик оброблюваного матеріалу σ_0 і m_c необхідно створити умови, подібні тим, при яких насправді утвориться зрізувана стружка, що є досить складним технічним завданням. Неточність результату, одержуваного при використанні наведеної формули, обумовлюється ще й тим, що в ній не враховується швидкість деформації (швидкість різання), а також сили на задній по-верхні леза інструмента.

1.2 Аналіз сил, що діють на різець

Для інженерних розрахунків більш доцільно використовувати не саму силу різання P , а її складові, наприклад, при точінні - три її взаємно перпендикулярні складові P_z , P_y і P_x , що є проекціями сили P на координатні осі Z , Y і X , відповідно (рис. 3 і 4): P_z – тангенціальна складова сили різання (тангенціальна сила) у напрямку швидкості головного руху різання; P_y – радіальна складова сили різання (радіальна сила) у напрямку, перпендикулярному напрямкам швидкостей головного руху різання й подачі; P_x - осьова складова сили різання (осьова сила) у напрямку, протилежному напрямку подачі.

Сила P_z прагне зігнути різець у площині її дії (у площині різання). Згинальний момент, створюваний цією силою $M_{изз} = P_z l$, де l – виліт різця з різцетримача (рис. 4а).



ë

Рисунок 3 - Схема сил, що діють на різець

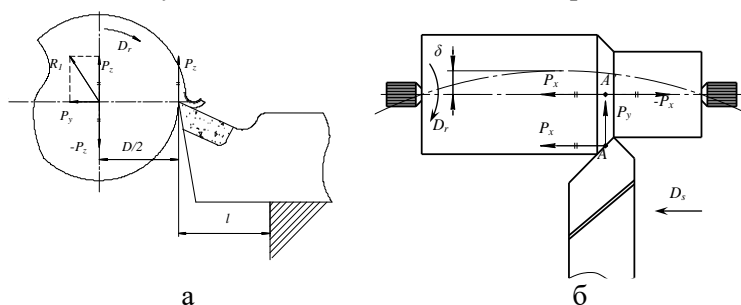


Рисунок 4 - Схема дії сил на заготовку при точінні: а - P_z і P_y ; б - P_x

за силою P_z підраховується крутний момент і потужність різання:

$$M_{кр} = \frac{P_z D}{2 \cdot 1000} [\text{Нм}]; \quad (0.5)$$

$$N_p = P_z v [\text{Вт}], \quad (0.6)$$

де P_z у Н;

D – діаметр оброблюваної поверхні, мм;

v – швидкість різання, м/с.

Примітка. Якщо P_z у кГс, а v у м/хв, формули (0.5) і (0.6) мають вигляд:

$$M_{кр} = P_z \frac{D}{2} [\text{кГс} \cdot \text{мм}]; \quad (0.7)$$

$$N_p = \frac{P_z v}{60 \cdot 102} [\text{кВт}]. \quad (0.8)$$

Сила P_y намагається «відіпхнути» різець від заготовки, а її реакція – зігнути оброблювану деталь (рис. 4а), тобто цю силу використовують для оцінки точності обробки.

Примітка. Варто мати на увазі, що вільна сила, яка залишилася, P_z (у центрі заготовки (рис. 4а)), також створює момент, що згинає заготовку. Згинаючу дію P_z варто розглядати в сукупності з дією складової сили різання P_y . Рівнодіюча цих двох сил $R_1 = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}$ згинає заготовку в площині, перпендикулярній її осі.

Крім того, сила P_y може бути джерелом виникнення вібрацій у горизонтальній площині та у значній мірі визначати висоту мікронерівностей (шорсткості) на обробленій поверхні.

Силу P_x (рис. 4б) переборює механізм подачі. За цією силою оцінюють його міцності характеристики та визначають потужність привода подачі верстата.

Примітка. При аналізі технологічної обробної системи (ТОС) - система «верстат - пристосування - інструмент - заготовка» - необхідно враховувати й момент, створюваний цією складовою сили різання (рис. 4б), що прагне «вирвати» оброблювану деталь із центрів.

Рівнодіюча P , як діагональ паралелепіпеда, дорівнює

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} . \quad (0.9)$$

Примітка. У ряді випадків обробки однієї із двох складових (P_y або P_x) може не бути.

Наприклад, при розрізанні прутка відрізним різцем відсутня сила P_x і тоді $P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}$; при поздовжньому точінні торця труби або підрізанні з $\varphi=90^\circ$ і $\lambda=0^\circ$ відсутня складова сили різання P_y і тоді $P = \sqrt{P_z^2 + P_x^2}$.

Експериментально встановлено, що при $\varphi=45^\circ$, $\lambda=0^\circ$; $\gamma=10^\circ - 15^\circ$ і $r_e=0$ співвідношення складових сили різання в середньому може бути прийнято таким, що дорівнює:

$$P_z:P_y:P_x=1:(0,4 - 0,45):(0, 3-0,35).$$

Примітки

1. При вказаних значеннях геометричних параметрів леза інструмента (різця) складові сили різання P_y і P_x повинні бути рівні.

2. У технічній літературі силу P_z часто називають *головною складовою сили різання* або просто – *силою різання*.

Величини складових сили різання P_z , P_y , P_x і співвідношення між ними залежать від елементів режиму різання, геометрії інструмента, матеріалу заготовки, зношування різця, складу СОТС та ін. Наприклад, при збільшенні швидкості різання відносини P_y/P_z і P_x/P_z зменшуються, а зі збільшенням зношування різця – зростають; зі збільшенням глибини різання, подачі й головного кута в плані P_x/P_z - зростають, а P_y/P_z - зменшуються.

Практичне заняття 2. Емпіричні залежності складових сили різання від умов обробки

Аналітичні методи визначення сили різання і її складових у цей час ще мають переважно теоретичний характер і для інженерних розрахунків практично не застосовуються. Тому для інженерних розрахунків найчастіше користуються емпіричними залежностями сил різання від умов обробки у вигляді

$$P_z = C_P t^{x_P} S^{y_P} V^{n_P} K_P \quad (0.10)$$

з відповідними індексами, тобто

$$P_z = C_{Pz} t^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}} V^{n_{Pz}} K_{Pz}; \quad (0.11)$$

$$P_y = C_{Py} t^{x_{Py}} S^{y_{Py}} V^{n_{Py}} K_{Py}; \quad (0.12)$$

$$P_x = C_{Px} t^{x_{Px}} S^{y_{Px}} V^{n_{Px}} K_{Px}. \quad (0.13)$$

Коефіцієнт C_P (0.10) (тобто C_{Px} , C_{Py} або C_{Pz}) характеризує конкретні умови обробки, при яких отримана відповідна формула. Ті параметри умов обробки, які відсутні у формулі в явному вигляді (властивості оброблюваного (м) і інструментального (і) матеріалів, геометричні параметри лез інструмента (γ , α , φ , r_b , ρ та ін.), наявність або відсутність МОТС, її склад, кількість, спосіб підведення та ін. фактори), враховуються за допомогою «поправочного» коефіцієнта K_P :

$$K_P = K_{MP} K_{UP} K_{\gamma P} K_{\alpha P} K_{\varphi P} K_{r_b P} \dots \quad (0.14)$$

Для відповідної складової сили різання цей коефіцієнт має вигляд:

$$\begin{aligned}
K_{P_z} &= K_{MP_z} K_{UP_z} K_{\gamma P_z} K_{\alpha P_z} K_{\varphi P_z} K_{r_{6P_z}} \dots \\
K_{P_y} &= K_{MP_y} K_{UP_y} K_{\gamma P_y} K_{\alpha P_y} K_{\varphi P_y} K_{r_{6P_y}} \dots \\
K_{P_x} &= K_{MP_x} K_{UP_x} K_{\gamma P_x} K_{\alpha P_x} K_{\varphi P_x} K_{r_{6P_x}} \dots
\end{aligned}
\quad (0.15)$$

Показники ступенів x_P , u_P і n_P характеризують ступінь впливу відповідного фактора (t , S або v) на силу різання, Наприклад, якщо який-небудь із зазначених факторів (наприклад, подачу при визначенні складової сили різання P_z) збільшити (зменшити) у два рази, то сила різання збільшиться (зменшиться) не у два рази, а у два у відповідному ступені рази. У розглянутому прикладі сила P_z збільшиться в $2^{y_{P_z}}$ рази.

Коефіцієнти та показники ступенів у формулах (0.11)-(0.13) визначаються на основі безпосереднього виміру складових сил різання за допомогою спеціальних приладів (динамометрів) і відповідної обробки результатів вимірювань.

Практичне заняття 3. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ

Прилади, призначені для вимірювання складових сили різання, називають динамометрами. Якщо динамометр вимірює одну складову, то він називається однокомпонентним, дві - двокомпонентним і три - трикомпонентним.

Для дослідження процесу різання застосовують динамометри:

- 1) при точінні, розточуванні, нарізуванні різьблення різцем і круглому шліфуванні - трикомпонентні;
- 2) при свердлінні, зенкеруванні, розгортанні, нарізуванні різьблення мітчиком - двокомпонентні, що вимірюють складову сили різання, спрямовану вздовж осі інструмента, і крутний момент;
- 3) при фрезеруванні площин, фасонних поверхонь, вінців зубчастих коліс, плоскому шліфуванні - однокомпонентні й трикомпонентні;
- 4) при протяганні, зубодовбанні в основному - однокомпонентні.

До динамометрів встановлюють такі основні вимоги:

- 1) точність вимірювання динамометром сил різання по-винна визначатися його призначенням. При порівняно грубих вимірюваннях сил, необхідних для визначення потужності, що витрачається на різання, розрахунків на жорсткість і міцність інструментів і деталей верстатів, точність повинна становити 2-3%. У динамометрів, призначених для дослідження фізичних процесів різання, точність вимірів повинна бути значно вище й становити 1-1,5%, а в деяких випадках доходити до 0,5%;

- 2) для реєстрації швидкозмінних в процесі різання сил динамометри повинні володіти малою інерційністю. Для цього частота власних коливань динамометра повинна значно перевершувати частоту коливань вимірюваної сили;

- 3) динамометри повинні бути вібростійкими при будь-яких швидкостях різання. Для цього пружні ланки динамометрів, що сприймають дію сил, повинні мати максимальну жорсткість;

- 4) у динамометрах повинен бути відсутнім взаємний вплив складових сили різання. Для цього датчик динамометра, що сприймає дію однієї зі складових сили різання, не повинен реагувати на дію інших складових.

Незалежно від конструкції динамометри складаються з таких основних частин:

- 1) датчика, що сприймає навантаження. Пружна деформація датчика безпосередньо або з використанням пов'язаних з нею явищ є основою для вимірювання сил різання;

- 2) приймача, що здійснює реєстрацію сигналу від датчика відповідно до діючого навантаження;

- 3) допоміжних ланок, що зв'язують датчик із приймачем.

Динамометри залежно від типів датчиків поділяють на три групи:

- 1) механічні (пружно-механічні);
- 2) гідравлічні;
- 3) пружно-електричні (електричні).

При використанні пружно-механічних динамометрів про величину вимірюваної сили судять за пружним прогином робочої частини динамометра, що виникає під дією цієї сили, який реєструється найчастіше індикатором годинникового типу (рис.5).

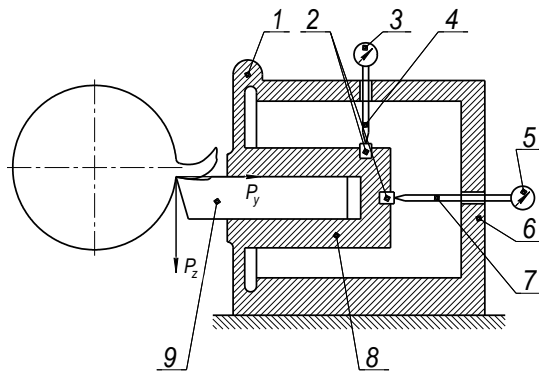


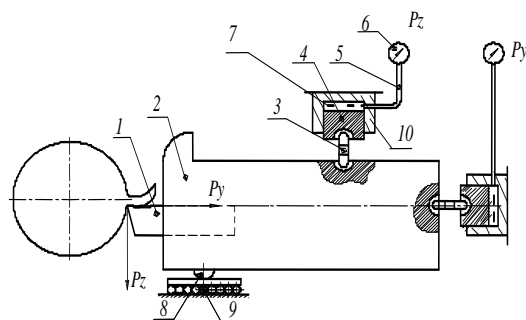
Рисунок 5 - Механічний динамометр

Під дією сил різання на різець 9 внаслідок деформації пружних стінок 1 корпуса 6 різцетримач 8 переміщується. Ці переміщення через сухарі 2 і ніжки 4 та 7 фіксуються індикаторами 3 і 5. Динамометри прості за конструкцією, мають досить високу точність і надійні в роботі при швидкостях різання, що не перевищують 2 – 3 м/хв, і при незначній зміні сили в часі. При більш високих швидкостях різання їх не застосовують внаслідок високої інерційності механічної системи індикатора. Під дією сили, що змінюється, або внаслідок вібрації системи «верстат - пристосування - інструмент – заготовка» коливання стрілки індикатора стають настільки значними, що це практично виключає оцінку значень вимірюваної сили із достатньою точністю вимірювання. Тому механічні динамометри застосовують, як правило, при дослідженні механіки процесу різання з мікрошвидкостями.

Гідравлічні динамометри можуть бути одно-компонентними або двокомпонентними.

Основою однокомпонентних гідравлічних динамометрів є гідравлічні месдозы. Вимірювана сила через відповідну механічну систему давить на поршень гідравлічної месдозы, витісняючи з її порожнини робочу рідину (гліцерин або касторове масло) у манометричну пружину Бурдона. Пружина зв'язана зі стрілкою гідравлічного манометра або пером самописа. Так як рідина практично нестислива, то відхилення стрілки манометра або пера самописа буде пропорційним величині вимірюваної сили.

Основою двокомпонентних гідравлічних динамометрів є важільно-поршнева система. Во-



ни мають такий устрій (рис. 6).

Рисунок 6 - Гідравлічний двокомпонентний динамометр

Різець 1, укріплений у коробці, або люльці 2, що може гойдатися щодо опори 8, а також переміщуватися на кульках 9 у горизонтальній площині.

Під дією сили P_z люлька прагне повернутися й тисне через стрижень 3 на поршень 4. Останній під тиском витісняє гліцерин 7 із циліндра 10 через трубку 5 у манометр 6, оснащений самописним механізмом. Вимірювання сили P_y провадиться аналогічним способом при горизонтальному переміщенні люльки.

Гідравлічні динамометри надійні й прості в поводженні. До їхніх недоліків варто віднести невисоку точність, інерційність, через що показання відстають від швидкоплинних процесів і

спотворюють картину зміни сил різання в часі й по величині, і великі габарити. Крім того, вони мають відносно малу чутливість. Точність вимірювання ними залежно від граничного навантаження становить 100 - 200 Н. Ці динамометри також мають обмежене застосування: їх застосовують для вимірювань сил і крутних моментів при швидкостях різання, що не перевищують 80 м/хв.

У цей час найбільше застосування отримали пружно-електричні (електричні) динамометри. Їхня дія заснована на перетворенні переміщення або деформації пружних ланок динамометра в електричний сигнал за допомогою електричних датчиків, тобто механічний вплив сил різання перетвориться в легко вимірювані електричні величини. **Електричні динамометри** мають високу точність вимірювання, практично безінерційні й малогабаритні. Вони є найбільш чутливими приладами й дозволяють за допомогою осцилографа або комп'ютера робити запис швидкоплинних процесів за тисячні й сотисячні долі секунд. Так, як для збудження електричного сигналу переміщення або деформація пружної ланки динамометра можуть становити кілька мікрометрів або навіть їхні десяти долі, то динамометри мають дуже високу жорсткість і внаслідок цього відносно малою чутливістю до вібрацій.

У ролі датчиків у динамометрах використовують ємнісні, вугільні, п'єзоелектричні, магнітопружні, індуктивні й дротяні датчики. Найбільше поширення знайшли індуктивні й дротяні датчики, що відносяться до параметричних електричних датчиків. Ці датчики компактні й дозволяють у ролі показуючих і записуючих пристроїв застосовувати універсальні прилади (гальванометри, магнітоелектричні та електронні осцилографи, комп'ютери).

Магнітоупружні та індуктивні датчики засновані на зміні опору струмонесучого контура, а, отже, і сили струму в обмотці.

Зміна сили різання відповідно змінює й величину вимірюваного струму. У ролі **магнітопружних** датчиків застосовуються котушки (рис. 7), у яких при постійній прикладеній напрузі змінного струму може змінюватися сила струму залежно від величини деформації її сердечника.

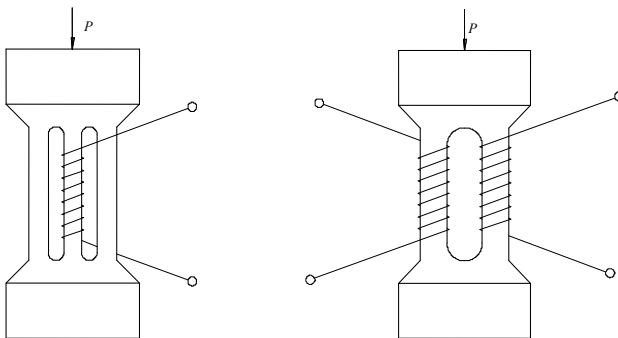


Рисунок 7 - Схеми магнітопружних датчиків

Для цих датчиків застосовують котушку змінного струму з **магнітопружним** сердечником з пермалою (78% Ni, інше - Fe, C та інші складові). Під впливом навантаження на сердечник залежно від ступеня механічного впливу на нього змінюється силове магнітне поле, що відображається на самоіндукції, а тим самим і на силі струму в котушці. При мало змінних напруженнях стиску **магнітопружний** ефект сталей. Для пермалою припустиме найбільше напруження 6 - 8 кГс/мм³, чим і визначаються мінімальні розміри датчика. Залежно від розміру корпусу власна частота коливань змінюється й доходить до 20кГц. При коливанні напруги в електричній мережі повинен бути передбачений стабілізатор напруги.

Принциповий устрій **індуктивного датчика** зі змінним повітряним зазором і включення його у вимірювальну схему зображений на рис. 8.

Конструктивно датчик може являти собою дві котушки (рухомо й нерухому), одна з яких включена в електричне коло зі змінним струмом (рис. 8а). Під впливом навантаження на рухому частину датчика, пов'язаного із залізним сердечником цієї котушки, змінюється зазор Δh (на соті долі міліметра), а разом з ним і сила індукційного струму у вторинній котушці, що реєструється вимірювальним приладом.

Датчик може також мати й тільки одну котушку із залізним сердечником (рис. 8б). При такій конструкції датчика його магнітний ланцюг замикає яркір - пружна ланка динамометра, на який діє вимірювана сила.

Робота датчика основана на зміні реактивного опору котушки при зміні її індуктивності, що залежить від магнітного опору, обумовленого площею поперечного перерізу залізного сердечника, його магнітною проникністю й величиною повітряного зазору Δh .

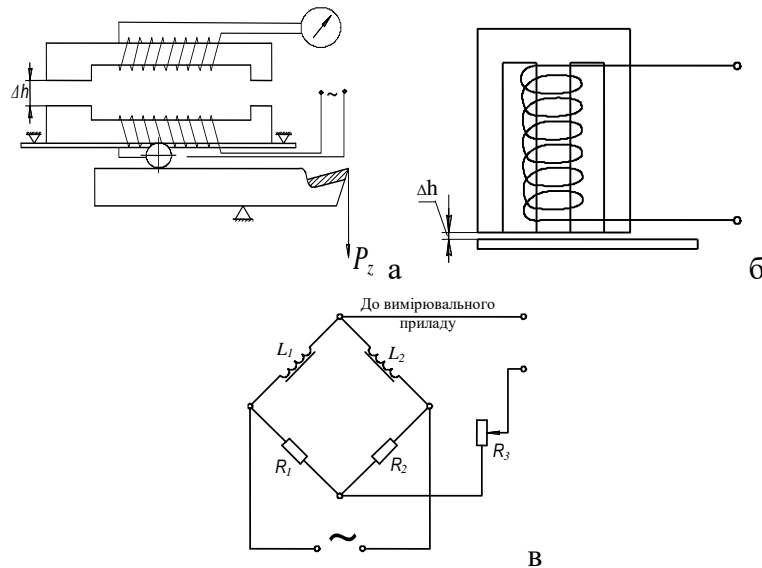


Рисунок 8 - Схеми індуктивного датчика (а, б) і включення його у вимірювальний ланцюг (в)

Таким чином, магнітний, а, отже, і реактивний опір котушки є пропорційним зміні величини повітряного зазору Δh . Датчик включений у вимірювальну мостову схему, яка живиться змінним струмом (рис. 8в). При рівності повітряних зазорів між ярком і сердечником робочого L_1 і компенсаційного L_2 датчиків міст збалансований і різниця потенціалів між його вузловими точками відсутня. Коли під дією вимірюваної сили відбудеться переміщення пружної ланки динамометра або його деформація, то це викличе зміну повітряного зазору й реактивного опору робочого датчика. Міст вийде з рівноваги й вимірювальний прилад зафіксує струм, сила якого пропорційна величині вимірюваної сили.

Примітка. R_1 і R_2 – врівноважуючі опори, R_3 потенціометр для установки приладу на нуль

Зазор Δh для великого діапазону вимірювань коливається у межах 0,1—0,2 мм. Вважають за доцільне, щоб зі збільшенням навантаження зазор не зменшувався, а збільшувався. У цьому випадку підвищується чутливість методу й, крім того, зі збільшенням Δh датчик охороняється від замикання.

Динамометри з *магнітопружними* та *індуктивними* датчиками живляться змінним струмом, тому показання вимірювального приладу можуть істотно спотворюватися при включенні й вимиканні верстатів, що працюють на змінному струмі й розташованих поруч з приладом. Ці спотворення важко повністю усунути навіть при використанні стабілізатора напруги. Варто мати на увазі, що відносно сильно спотворюються показання приладу й при вібраціях у ТОС.

Дротові або **тензометричні** датчики складаються з певної кількості витків із тонкого дроту діаметром від 0,015 до 0,06 мм зі спеціального сплаву ніхром-константан, що різко змінює свій електричний опір при деформації. Витки або решітка з такого дроту поміщаються між двома склеєними паперовими смужками та наклеюються на пружно деформований елемент, наприклад, на утримувач різця (рис. 9).

Під впливом сил різання утримувач різця 1 і приклеєний до нього дріт $б$ деформуються (рис. 9а). Це викликає зміну сили струму в електричному колі, що збільшується підсилювачем 3 і вимірюється гальванометром або іншим яким-небудь реєструвальним приладом 2 . Щоб не бу-

ло спотворень у показаннях приладів при вимірі сил різання через мінливість напруги в мережі, в електричне коло необхідно включати стабілізатор напруги 4, установлений між реєструвальним приладом і джерелом живлення 5.

Вимірювальна схема для дротових датчиків зображена на рис. 9б. Компенсаційний датчик R_2 не тільки врівноважує міст, але й служить для компенсації впливу температури на опір дроту датчика. Для цього компенсаційний датчик наклеюють поруч із робочим датчиком R_1 , але так, щоб його деформація при деформації пружної ланки була нехтовно малою.

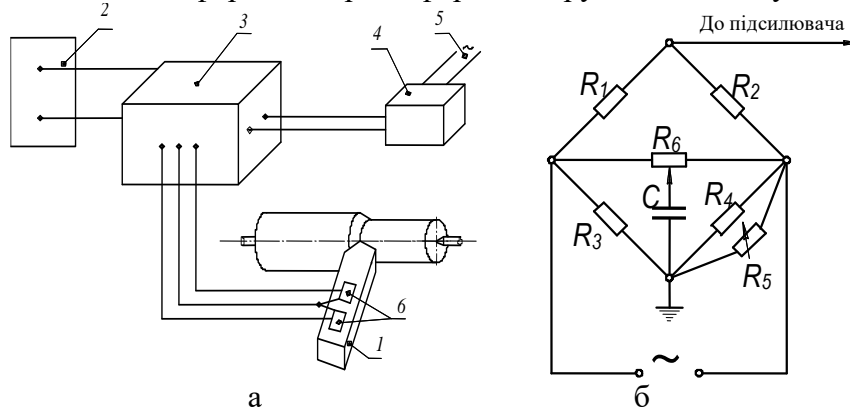


Рисунок 9 - Схеми вимірювання сил різання з використанням тензодатчиків (а) і включення їх у вимірювальну схему: R_1 - робочий датчик; R_2 – компенсаційний датчик; R_3 і R_4 – постійні опори; R_5 і R_6 - потенціометри

Міст живиться від спеціального генератора змінного струму із частотою 1000 - 10000 Гц. При настільки високій частоті ємнісні опори сполучних проводів досить великі й для їхньої компенсації передбачене балансування мосту за допомогою потенціометра R_6 і постійного конденсатора C , включеного паралельно плечам R_3 і R_4 . Потенціометр R_5 служить для балансування активних опорів плечей перед початком роботи.

Дія **п'єзоелектричних динамометрів** оснований на властивості деяких кристалів (кварц, турмалін і ін.) генерувати при їх стисканні електричні заряди (п'єзоелектрика), величина яких пропорційна прикладеній силі. Найчастіше застосовують кварц, що допускає навантаження до 10 кГс/мм², і малочутливий до зміни температури. Так як величини зарядів, що знімаються з одного кристала, дуже малі, то для збільшення загальної величини заряду складають ряд паралельно з'єднаних кристалів; але й при цьому заряди, що утворяться, усе ще настільки незначні, що для їхньої реєстрації (осцилографом або високочутливим гальванометром) попередньо необхідно підсилювати за допомогою спеціальних пристроїв - підсилювачів.

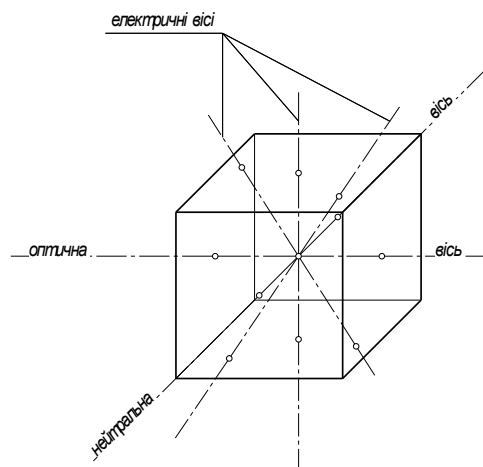


Рисунок 10 - Схема п'єзоелектричного елемента

П'єзоелектричні динамометри практично безінерційні і тому особливо придатні для виміру швидкозмінних процесів.

До недоліків цих приладів варто віднести відносну складність високочастотних пристроїв, що вимагають кваліфікованого обслуговування.

Добрі результати при дослідженнях швидкоплинних процесів мають місце також при використанні *ємнісних динамометрів*, принцип дії яких оснований на зміні ємності конденсатора, що знаходиться під впливом вимірюваної сили, наприклад, P_z .

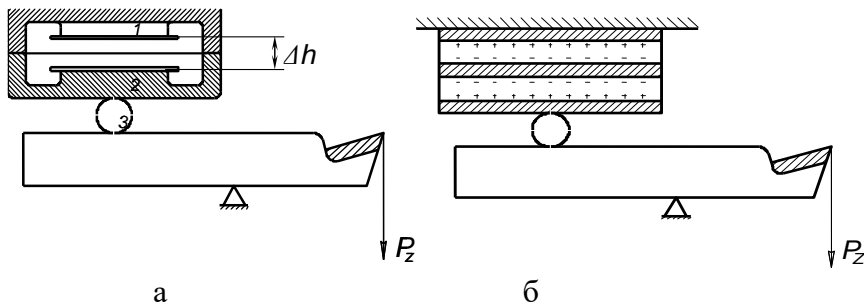


Рисунок 11 - Схеми динамометрів з ємнісними датчиками

У *ємнісних* датчиках (рис. 11) сила різання за допомогою різцетримача і кульки 3 робить переміщення пружної пластини конденсатора 2 щодо нерухомої пластини 1 (рис. 11а), змінюючи повітряний зазор Δh , а, отже, і ємність конденсатора. Зміна ємності за допомогою високочастотного пристрою приводить до зміни сили струму, який реєструється гальванометром, осцилографом або комп'ютером. Для підвищення точності визначення сили датчики можуть складатися з декількох конденсаторів, паралельно з'єднаних між собою (рис. 11б).

Вибір методу вимірювання. У теперішній час переважно використовуються електричні методи вимірювання.

Порівняльна оцінка різних електричних динамометрів наводиться в табл. 1. Позитивній оцінці тієї або іншої властивості відповідає знак (+), негативній - знак (-). Знак 0 (нуль) показує відсутність як позитивних, так і негативних якостей. Як видно з таблиці, останні три методи мають найбільші переваги. У теперішній час все частіше, як датчики для вимірювання навантаження при роботі різних різальних інструмент (різців, свердлів, фрез і ін.) застосовують дротові тензометри.

Необхідно враховувати, що електричні динамометри, як правило, не дають нам безпосередньо значень сил різання, а дають якісь умовні показання, пропорційні силам різання. Щоб одержати безпосередні значення величин сил різання, необхідно зробити їх тарування.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика електричних динамометрів

Метод вимірювання	Вимірювальний зсув	Розміри	Діапазон вимірювання	Точність	Схильність перешкодам	Інерційність	Легкість тарування	Витрати	Простота обслуговування
П'єзоелектричний	+	+	+	+	0	++	-	--	--
Ємнісний	+	-	+	+	0	++	+	-	-
Вугільного опору	+	+	+	+	0	++	0	+	++
Рідинного опору	+	+	+	0	0	0	0	+	+
Індуктивний	+	++	++	+	++	+	+	++	++
Магнітний	+	++	+	+	++	+	+	+	+
Тензометричний	+	++	+	+	++	+	+	+	++

Процес тарування полягає в тому, що датчикам динамометра задають заздалегідь відомі навантаження P_i за допомогою найпростіших механічних пристроїв. Потім, помічаючи показання динамометра, наприклад, у mV , що відповідають різним навантаженням P_i , будують тарувальний графік (рис. 12). Надалі величини сил різання знаходять за показниками динамометра з тарувальних графіків.

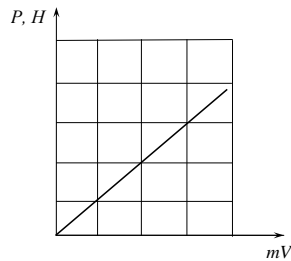


Рисунок 12 – Тарувальний графік

У виробничих умовах для визначення сил різання неможливо щораз користуватися динамометрами, робити їх тарування, використовувати дорогі й чутливі прилади. Тому у разі потреби на практиці користуються більш простими засобами для вимірювання сил різання, наприклад, шляхом вимірювання моменту тертя або витрат енергії ватметрами та ін. Цей спосіб може дати прийнятні для виробництва результати тільки в тому випадку, якщо відомо ККД верстата. Момент тертя вимірюють за допомогою гальмових пристроїв, що відносяться до найбільш простих засобів визначення сили різання й ККД верстата. Перевага цього методу - у простоті пристрою, що не вимагає спеціальної дорогої апаратури. Недоліком його є неточність показань, тому що гальмування шківів створює інші умови роботи шпинделя, ніж одnobічний тиск різця на заготовку. Крім того, методом гальмування можна визначити тільки величину дотичної складової сили різання P_z . Настільки само неточний і інший непрямий метод визначення сили різання - за витратою споживаної верстатом потужності: визначається тільки дотична сила різання P_z і потрібно для забезпечення достатньої точності розрахунку знання ККД верстата й електродвигуна при різних режимах їхньої роботи.

Практичне заняття 4. УСТРІЙ І ПРИНЦИП РОБОТИ ДИНАМОМЕТРА УДМ

Серед динамометрів із дрововими датчиками найбільше поширення знайшов універсальний трикомпонентний динамометр УДМ конструкції Б.І. Мухіна (ВНДІ), схема вимірювання яким (рис. 13а) включає динамометр з тензодатчиками, підсилювач, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та ЕОМ, що реєструє дані. Динамометр дозволяє вимірювати складові сили різання при точінні, нарізуванні різьблення різцем, фрезеруванні та плоскому шліфуванні, осьову силу й крутний момент при свердлінні, розгортанні, зенкеруванні й нарізуванні різьблення мітчиком або плашкою та ін. Залежно від максимальної величини вимірюваної головної складової сили різання P_z випускають динамометри УДМ-100, УДМ-600 і УДМ-1200 з різними межами виміру сили P_z - 1000, 6000 і 12000 Н (100, 600 і 1200 кгс) відповідно.

За допомогою УДМ можна одночасно вимірювати сили P_z , P_y , P_x і крутний момент $M_{кр}$. Максимально припустиме навантаження на опори у динамометра УДМ-600 становить: вертикальне - не більше 6000 Н, горизонтальне - не більше 3000 Н. У ролі підсилювача та АЦП використовується крейтова система LTR-U-1 з модулем LTR-212 компанії L-CARD.

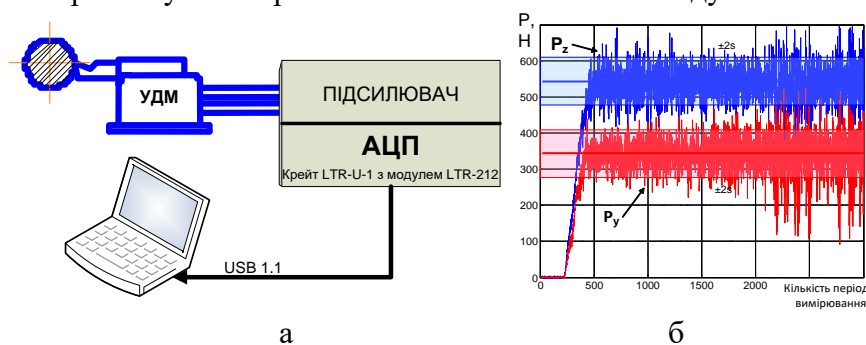


Рисунок 13 - Принципова схема вимірювання сил різання УДМ (а) та приклад графіків зареєстрованих сил різання (б)

Миттєве значення сил різання реєструється ЕОМ та представляється на екрані у вигляді графіків (рис. 136).

Плита із круглим фланцем, який служить для закріплення змінних пристосувань (різцетримача при точінні, патрона при свердлінні, лещат при фрезеруванні), встановлюється в корпусі на 16 пружних опорах (рис. 14) з термічно обробленої сталі, які мають високу жорсткість уздовж осі й малу жорсткість у напрямку, перпендикулярному до неї. Осі опор 1-8 розташовані вертикально, опор 9-15 – горизонтально. При точінні вертикальні опори пружно деформуються під дією сили P_z , горизонтальні – під дією сил P_y , і P_x .

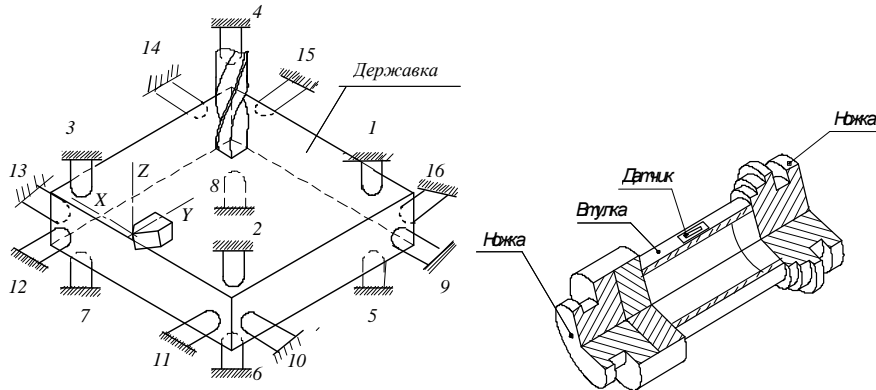


Рисунок 14 – Схема розташування опор УДМ

Рисунок 15 – Опора УДМ

Опора являє собою тонкостінну втулку із двома ніжками (рис. 15). Площі перерізу втулки й ніжки обрані такими, щоб матеріал опор при навантаженні працював в області пружних деформацій. На втулки строго уздовж осі наклеєні дровотві датчики з базою 10 мм і номінальним опором 100 Ом.

На вертикальні опори, що сприймають навантаження, які діють уздовж осі Z (для вимірювання сили P_z при точінні або осьової сили при свердлінні) наклеєні по одному датчику; на горизонтальні опори, що сприймають навантаження, які діють уздовж осей Y і X (для вимірювання сил P_y і P_x при точінні або крутного моменту при свердлінні) - по два. У процесі деформації опор під дією відповідних навантажень, внаслідок зміни опору датчиків, відбувається розбалансування мосту (рис. 16). Різниця потенціалів підсилюється у модулі LTR-212 та перетворюється у цифровий вигляд за допомогою АЦП. З метою захисту системи від перенавантажень модуль LTR-212 гальванічно розв'язано від контролера крейта LTR-U-1. Отже цифрові дані надходять до контролера від модуля LTR-212 через оптрони. Далі дані накопичуються контролером та передаються до ЕОМ через порт USB 1.1. Частота дискретизації АЦП – 7680Гц.

Керування системою здійснюється з ЕОМ за допомогою спеціального програмного забезпечення.

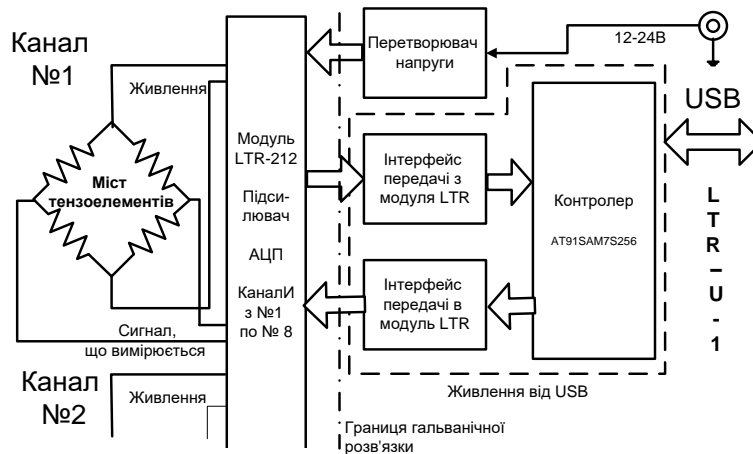


Рисунок 16 - Схема включення датчиків у вимірювальний ланцюг

Підготовка динамометра УДМ-600 до роботи:

- встановити різець у різцетримач динамометра, розташованого на супорті верстата;
- включити та прогріти апаратуру протягом 15-20 хв;
- установити величину посилення m для кожної складової сили різання (для $P_z - m_z=1$; для $P_y - m_y=2,5$; для $P_x - m_x=5$),
- виконати балансування мостів.

Практичне заняття 5. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Точіння провадиться прохідними різцями при невеликому різанні. Робота включає чотири серії дослідів. У всіх серіях швидкість різання залишається постійною і визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi D n}{1000} \text{ [м/хв]}, \quad (0.1)$$

де D - діаметр заготовки, мм; n -частота обертання шпинделя, об/хв.

Примітка. Необхідно звернути увагу на те, що режим обробки повинен бути таким, щоб було відсутнє наростування

У першій серії (досліди 1-5) змінною є глибина різання t . Усі інші параметри вважаються постійними. У другій серії (досліди 6-10) змінною є подача S при незмінних інших умовах обробки. У третій і четвертій серіях елементи режиму різання залишаються постійними, а змінюються відповідно передній кут γ (досліди 11-14) і кут у плані φ (досліди 15-16). У всіх дослідях вимірювання кожної складової сили різання провадиться не менше трьох разів, отримані показання за допомогою тарувальних графіків переводяться в значення сил різання, які заносяться у відповідні таблиці.

Методами математичної обробки експериментальних даних виводяться окремі та загальні залежності складових сили різання від досліджуваних факторів.

Математична обробка результатів експерименту

Численні дослідження показали, що вплив різних факторів на сили різання може найзручніше і досить точно описуватися степеневою функцією вигляду $y=kx^m$. Графічно вона виражається кривою, поданою на рис. 17а. Сутність математичної обробки експериментальних даних полягає у визначенні значень показника ступеня m і коефіцієнта k .

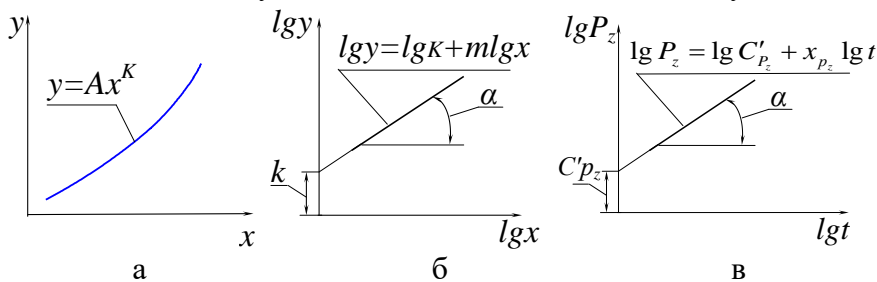


Рисунок 17 - Графічне представлення степеневої функції

Якщо прологарифмувати вираз $y=kx^m$, то одержимо рівняння прямої $lgy=lgk+mlgx$ (рис.17б), у якому значення m дорівнює тангенсу кута нахилу α прямої до позитивного напрямку осі абсцис ($m=tg\alpha$), а значення k дорівнює відрізку, що відсікає пряма на осі ординат при $lgx=0$, тобто при $x=1$.

Показник ступеня m і постійної k можна знайти як графічно, так і аналітично.

Примітка. Якщо степеневу залежність $y=kx^m$ подати у вигляді частинної залежності якої-небудь складової сили різання, наприклад, P_z від якого-небудь фактора, наприклад, t , то її при $S=const$, $v=const$ і $K_{P_z}=const$ можна записати, як $P_z = C'_{P_z} t^{x_{P_z}}$ (див. (7)), де

$C'_{P_z} = C_{P_z} S^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K_{P_z}$. Ця частинна залежність після логарифмування матиме вигляд $\lg P_z = \lg C'_{P_z} + x_{P_z} \lg t$, графічна інтерпретація якої в логарифмічній системі координат подана на рис. 17в. При цьому $x_{P_z} = \lg \alpha$

Графічний метод

Графічний метод знайшов широке застосування, але він дає гарні за точністю результати тільки в тому випадку, коли експериментальні точки досить щільно групуються уздовж прямої лінії. Щоб не розраховувати логарифми величин x та y , експериментальні точки при графічній обробці наносять у подвійній логарифмічній системі координат, де по осях від початкової точки в деякому масштабі відкладаються відрізки, такі, що дорівнюють десятковим логарифмам ряду чисел. Таким чином, на логарифмічній шкалі відстань від мітки 1 до мітки x_i дорівнює в обраному масштабі $\lg x_i$.

Примітка. Для побудови логарифмічної сітки можна використати будь-яку шкалу логарифмічної лінійки.

Приклад. Потрібно встановити залежність сили P_z від глибини різання t і подачі S при $v = \text{const}$. Для цього різцем №1 проводимо дві серії дослідів з вимірювання сил різання: одна – при змінній глибині різання t й $S = \text{const}$ (табл. 2), друга – при змінній подачі S й $t = \text{const}$ (табл. 3). Кожен дослід повторюємо тричі та визначаємо середнє значення сили \bar{P}_z . Слід звернути увагу, на те, що в розглянутому прикладі було проведено дві серії дослідів по $n = 3$ досліда в кожній серії. Кожний дослід повторювався $N = 3$ рази. Загальна кількість дослідів дорівнює $n_1 = 2 \times 3 = 6$.

Таблиця 2 - $S=0,3$ мм/об

t, мм	1,0	2,0	3,0
P_z, H	2500	4000	6200
	1900	4100	6230
	1900	3900	6170
\bar{P}_z, H	2100	4000	6200
σ_p, H	346,4	100,0	30,0

Таблиця 3 - $t=2$ мм

S, мм/об	0,1	0,3	0,5
P_z, H	1920	4200	6000
	1810	2800	5810
	1670	2900	6190
\bar{P}_z, H	1800	3300	6000
σ_p, H	125,3	781,0	190,0

Результати вимірювань наносимо на подвійну логарифмічну сітку (рис.18). Прямі проводимо так, щоб сума відстаней від експериментальних точок до відповідної прямої була мінімальною. Тангенси кутів нахилу прямих є показниками ступенів у формулах – окремих залежностях:

$$P'_z = C'_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \quad \text{і} \quad P''_z = C''_{P_z} \cdot S^{y_{P_z}}. \quad (0.1)$$

Для визначення x_{P_z} і y_{P_z} досить взяти на відповідній прямій будь-які дві точки, наприклад, точки А і В на прямій 1 для функції $P_z = f(t)$, виміряти відрізки $BC=a_1$ і $AC=b_1$ у мм і взяти їхнє відношення:

$$x_{P_z} = \frac{a_1}{b_1} = 0,95. \quad (0.2)$$

Значення коефіцієнт C'_{P_z} визначається прямо із графіка при $t=1$ мм - $C'_{P_z} = 2100$. Аналогічним образом визначаються значення y_{P_z} і C''_{P_z} . У цьому разі - $y_{P_z} = 0,73$ і $C''_{P_z} = 9700$ (при $S=1$ мм/об).

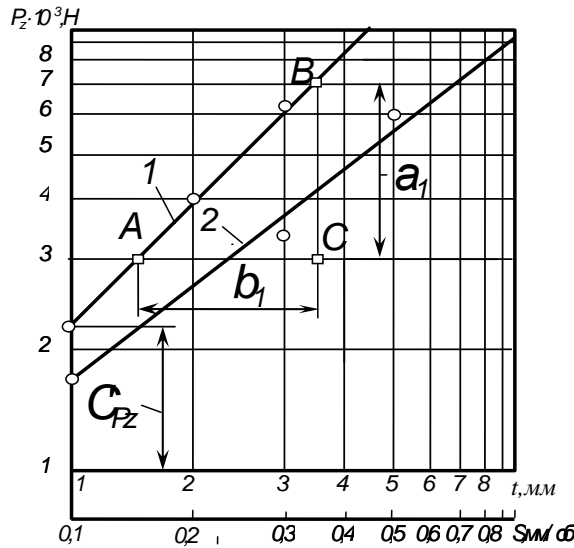


Рисунок 18 – Графічна інтерпретація окремих залежностей
 1 - $P_z = f(t)$; 2 - $P_z = f(S)$

У результаті шукані окремі залежності матимуть вид:

$$P'_z = 2100 \cdot t^{0,95} \quad \text{і} \quad P''_z = 9700 \cdot S^{0,73}. \quad (0.3)$$

Для одержання узагальненої залежності $P_z = C_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot S^{y_{p_z}}$ дорівнюємо праві частини окремих та узагальненої залежностей:

$$C'_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}} = C_{p_z1} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot S^{y_{p_z}}; \quad C''_{p_z} \cdot S^{y_{p_z}} = C_{p_z2} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot S^{y_{p_z}}, \quad (0.4)$$

де t і S - значення глибини різання й подачі, прийняті постійними при проведенні відповідно першої й другої серій дослідів. У цьому разі $t=2$ мм і $S=0,3$ мм/об.

З виразів (0.4) можна визначити:

$$C_{p_z1} = \frac{C'_{p_z}}{S^{y_{p_z}}} \quad \text{і} \quad C_{p_z2} = \frac{C''_{p_z}}{t^{x_{p_z}}},$$

остаточне значення постійної C_{p_z} береться як середнє арифметичне

$$C_{p_z} = \frac{C_{p_z1} + C_{p_z2}}{2}.$$

Для розглянутого випадку:

$$C_{p_z1} = \frac{2100}{0,3^{0,73}} = 5060; \quad C_{p_z2} = \frac{9700}{2^{0,95}} = 5020; \quad C_{p_z} = \frac{5060 + 5020}{2} = 5040.$$

Остаточна емпірична залежність сили P_z від глибини різання t і подачі S для розглянутого приклада запишеться в такий спосіб:

$$P_z = 5040 \cdot t^{0,95} \cdot S^{0,73} \quad [\text{Н}]. \quad (0.5)$$

Примітка. Аналогічно визначаються залежності $P_y = f(t, S)$ й $P_x = f(t, S)$.

Практичне заняття 6. МЕТОД НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

Метод заснований на тому положенні, що найбільш точна апроксимація будь-якої функції $y = f(x)$ буде в тому разі, якщо сума квадратів відхилень розрахункових значень $f(x_i)$ від експериментальних y_i є мінімальною, тобто

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \rightarrow \min. \quad (0.6)$$

У разі визначення невідомих, наприклад, x_p та C_p у окремій залежності $P'_z = C'_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}}$ логарифмуємо цю залежність та подаємо її у вигляді лінійної залежності вже відносно x_p та $\lg C_p$ (див. рис. 176):

$$\lg P = \lg C_p + x_p \lg t.$$

Тоді умова (0.6) матиме вид

$$E = \sum [\lg P_i - (\lg C_p + x_p \lg t_i)]^2 \rightarrow \min. \quad (0.7)$$

Мінімум функції E можна визначити з системи рівнянь: $\frac{\partial E}{\partial (\lg C_p)} = 0$ і $\frac{\partial E}{\partial x_p} = 0$. Після диференціювання та відповідних перетворень одержуємо систему рівнянь відносно невідомих x_p та $\lg C_p$:

$$\begin{cases} \sum \lg P_i = n \cdot \lg C_p + x_p \cdot \sum \lg t_i \\ \sum \lg P_i \cdot \lg t_i = \lg C_p \cdot \sum \lg t_i + x_p \cdot \sum (\lg t_i)^2 \end{cases}; \quad (0.8)$$

з яких визначаються невідомі для окремих залежностей:

$$\lg C_p = \frac{\sum \lg P_i \cdot \sum (\lg t_i)^2 - \sum \lg t_i \cdot \sum \lg P_i \cdot \lg t_i}{n \cdot \sum (\lg t_i)^2 - (\sum \lg t_i)^2}; \quad (0.9)$$

$$x_p = \frac{n \cdot \sum \lg P_i \cdot \lg t_i - \sum \lg t_i \cdot \sum \lg P_i}{n \cdot \sum (\lg t_i)^2 - (\sum \lg t_i)^2}, \quad (0.10)$$

де n - число дослідів у відповідній серії.

Параметри іншої окремої залежності знаходимо аналогічно. Для знаходження чисельних значень x_p , y_p і C_p в узагальненому рівнянні $P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p}$ вирішується загальна задача, тобто задача визначення невідомих для обох серій дослідів. Шляхом логарифмування ступеневу залежність подано у вигляді лінійного полінома

$$\lg P = \lg C + x_p \cdot \lg t + y_p \cdot \lg S. \quad (0.11)$$

Аналогічно попередньому прикладу після диференціювання суми квадратів відхилень і відповідних перетворень одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} n \cdot \lg C_p + x_p \cdot \sum \lg t_i + y_p \cdot \sum \lg S_i = \sum \lg P_i \\ \lg C_p \cdot \sum \lg t_i + x_p \cdot \sum (\lg t_i)^2 + y_p \cdot \sum \lg t_i \cdot \lg S_i = \sum \lg P_i \cdot \lg t_i \\ \lg C_p \cdot \sum \lg S_i + x_p \cdot \sum \lg t_i \cdot \lg S_i + y_p \cdot \sum (\lg S_i)^2 = \sum \lg P_i \cdot \lg S_i \end{cases}; \quad (0.12)$$

де n - загальна кількість дослідів.

Ця система є системою лінійних рівнянь відносно $\lg C_p$, x_p , y_p з постійними коефіцієнтами

$$\begin{cases} a_{11} \lg C_p + a_{12} x_p + a_{13} y_p = b_1 \\ a_{21} \lg C_p + a_{22} x_p + a_{23} y_p = b_2 \\ a_{31} \lg C_p + a_{32} x_p + a_{33} y_p = b_3 \end{cases}. \quad (0.13)$$

Її легко можна розв'язати методом Гауса.

Приклад

1 Для одержання узагальненої емпіричної залежності $P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p}$ для приклада, розглянутого в розд. 7.1, занесемо в табл. 4 результати експериментів з табл. 2 та 3. У цю саму таблицю заносимо й результати обчислень сум із системи (0.13) (табл. 4). На підставі отриманих розрахункових даних складемо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} 6 \cdot \lg C_p + 1,681 \cdot x_p - 3,393 \cdot y_p &= 21,269 \\ 1,681 \cdot \lg C_p + 0,590 x_p - 0,956 y_p &= 6,070 \\ -3,393 \cdot \lg C_p - 0,956 \cdot x_p + 2,184 \cdot y_p &= -11,836 \end{aligned} \right\} \quad (0.14)$$

Виконуючи ділення кожного рівняння на коефіцієнт перед $\lg C_p$ запишемо систему у матричній формі

$$\begin{bmatrix} 1 & 0,280 & -0,565 \\ 1 & 0,351 & -0,569 \\ 1 & 0,282 & -0,644 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lg C_p \\ x_p \\ y_p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,545 \\ 3,611 \\ 3,489 \end{bmatrix}.$$

Звідси методом Гауса: $\lg C_p = 3,688$, $x_p = 0,971$, $y_p = 0,733$ і, остаточно, $P_z = 4875 \cdot t^{0,971} \cdot S^{0,733}$.

Таблиця 4 - Приклад розрахунку коефіцієнтів системи рівнянь (0.13)

Номер досліджу	S, мм/об	t, мм	\bar{P} , Н	n	lg(t)	lg(s)	lg(P)	lg(t)	lg(t) ²	lg(S)·lg(t)	lg(P)·lg(t)	lg(s)	lg(t)·lg(s)	lg(s) ²	lg(P)·lg(s)	P, Н	$(P(t,s) - \bar{P})^2$
1	0,3	1,0	2100	1	0,000	-0,523	3,322	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,523	0,000	0,273	-1,737	2095,7	18,4
2	0,3	2,0	4000	1	0,301	-0,523	3,602	0,301	0,091	-0,157	1,084	-0,523	-0,157	0,273	-1,883	4076,8	5899,5
3	0,3	3,0	6200	1	0,477	-0,523	3,792	0,477	0,228	-0,249	1,809	-0,523	-0,249	0,273	-1,983	6016,8	33550,5
4	0,1	2,0	1800	1	0,301	-1,000	3,255	0,301	0,091	-0,301	0,980	-1,000	-0,301	1,000	-3,255	1788,5	133,2
5	0,3	2,0	3300	1	0,301	-0,523	3,519	0,301	0,091	-0,157	1,059	-0,523	-0,157	0,273	-1,840	4076,8	603431,0
6	0,5	2,0	6000	1	0,301	-0,301	3,778	0,301	0,091	-0,091	1,137	-0,301	-0,091	0,091	-1,137	5980,1	396,9
Сума				6	1,681	-3,393	21,269	1,681	0,590	-0,956	6,070	-3,393	-0,956	2,184	-11,836		643429,4
				a11	a12	a13	b1	a21	a22	a23	b2	a31	a33	a32	b3		214476,5
				Коефіцієнти рівнянь системи												σ_{ad}^2	

7.3 Розрахунок C_p , x_p , y_p за допомогою ЕОМ

Розрахунок параметрів C_p , x_p , y_p може бути виконаний за допомогою ЕОМ із застосуванням, наприклад, програми Microsoft Excel. Для цього дані експерименту повинні бути занесені в таблицю, аналогічно тій, що наведено на рисунку 19. Кожен рядок відбиває дані одного досліджу. Результати вимірювання сили в кожному повторенні досліджу розташовуються у відповідних стовпцях праворуч. Дані в таблиці повинні бути згруповані так, щоб результати дослідів з однаковим режимом різання розташовувати один біля іншого й були відсортовані за зростанням подачі S та глибини різання t (рисунок 19).

Після цього для кожного рядка визначається математичне очікування сили \bar{P}_z з використанням функції «СРЗНАЧ» і середнє квадратичне відхилення σ_p з використанням функції «СТАНДОТКЛОН». Відповідні формули подані на рисунку 20.

Для знаходження невідомих параметрів емпіричного рівняння необхідно в трьох вільних клітинках активного аркуша задати довільні початкові значення C_p , x_p , y_p . Наприклад, в

клітинках A13, B13, C13 (рисунки 19 та 20). У стовпці праворуч від розрахованих значень σ_p необхідно задати шукане емпіричне рівняння (наприклад, (0.11)), використовуючи посилення на задані початкові значення C_p , x_p , y_p й елементи режиму різання, які зазначені в даному рядку, і обчислити в першому наближенні розрахункове значення сили $P_{расч}$. У розглянутому прикладі це стовпець J на рисунках 19 та 20.

Отримані значення є основою для обчислення величини функціонала - цільової функції E в задачі мінімізації (0.6). Для цього необхідно в стовпці праворуч від стовпця із $P_{расч}$ обчислити $\Delta P^2 = (P_{расч} - \bar{P})^2$. У прикладі (рисунки 19 та 20) це реалізовано в стовпці K.

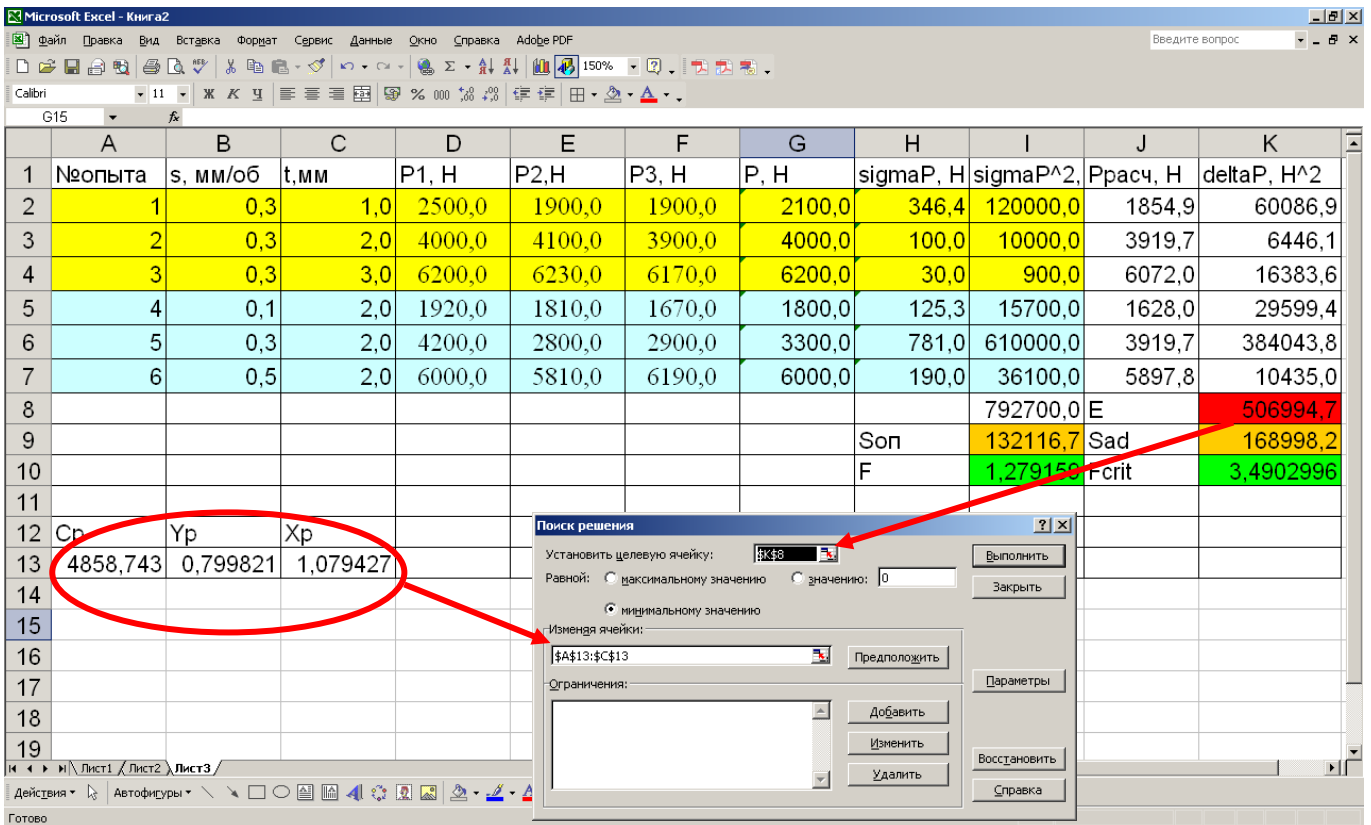


Рисунок 19 - Приклад аркуша Microsoft Excel з розрахунком коефіцієнтів емпіричного рівняння

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Неопыта	s, мм/об	t, мм	P1, Н	P2, Н	P3, Н	P, Н	sigmaP, Н	sigmaP^2, Н	Pрасч, Н	deltaP, Н^2
2	1	0,3	1	2500	1900	1900	=СРЗНАЧ(D2:F2)	=СТАНДОТКЛОН(D2:F2)	=H2*H2	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B2;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C2;\$C\$13)	=(G2-J2)*(G2-J2)
3	2	0,3	2	4000	4100	3900	=СРЗНАЧ(D3:F3)	=СТАНДОТКЛОН(D3:F3)	=H3*H3	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B3;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C3;\$C\$13)	=(G3-J3)*(G3-J3)
4	3	0,3	3	6200	6230	6170	=СРЗНАЧ(D4:F4)	=СТАНДОТКЛОН(D4:F4)	=H4*H4	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B4;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C4;\$C\$13)	=(G4-J4)*(G4-J4)
5	4	0,1	2	1920	1810	1670	=СРЗНАЧ(D5:F5)	=СТАНДОТКЛОН(D5:F5)	=H5*H5	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B5;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C5;\$C\$13)	=(G5-J5)*(G5-J5)
6	5	0,3	2	4200	2800	2900	=СРЗНАЧ(D6:F6)	=СТАНДОТКЛОН(D6:F6)	=H6*H6	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B6;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C6;\$C\$13)	=(G6-J6)*(G6-J6)
7	6	0,5	2	6000	5810	6190	=СРЗНАЧ(D7:F7)	=СТАНДОТКЛОН(D7:F7)	=H7*H7	=\$A\$13*СТЕПЕНЬ(B7;\$B\$13)*СТЕПЕНЬ(C7;\$C\$13)	=(G7-J7)*(G7-J7)
8									=СУММ(I2:I7)	E	=СУММ(K2:K7)
9								Sop	=I8/A7	Sad	=K8/(A7-3)
10								F	=K9/I9	Fcrit	=FPАСПОБФ(0,05,3,12)
11											
12	Cp	Yp	Xp								
13	4858,743	0,799821	1,079427								

Рисунок 20 - Розрахункові формули в клітинках аркуша на рисунку 19

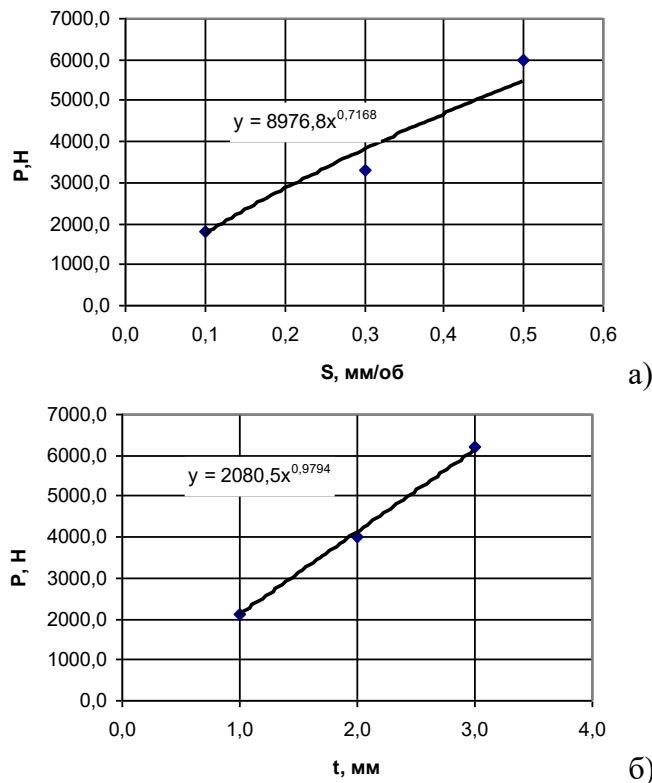


Рисунок 21 - Графіки окремих залежностей і рівняння лінії тренда: а) вплив подачі S ; б) вплив глибини різання t

Величина E може бути обчислена як сума значень по клітинках стовпця з ΔP^2 . У прикладі це значення обчислене в клітинці **K8**.

Для підбора таких значень C_p , x_p , y_p (клітинок **A13**, **B13**, **C13**), які мінімізують цільову функцію E (клітинка **K8**) необхідно використати команду «Головне меню\Сервіс\Пошук рішення» (рисунок 19). У формі, що з'являється, необхідно вказати цільову клітинку (у прикладі - **K8**), вказати, що її необхідно мінімізувати. У розділі «Змінюючи клітинки» необхідно вказати клітинку з початковими значеннями C_p , x_p , y_p (у прикладі - **A13**, **B13**, **C13**). При натисканні кнопки «Виконати» програма зробить пошук оптимальних значень C_p , x_p , y_p і замінить на них початкові значення C_p , x_p , y_p (у прикладі в клітинках **A13**, **B13**, **C13**). Величина E при цьому буде мінімально можливою в заданих умовах.

Перелік стандартних функцій Microsoft Excel, які необхідно використати при розрахунках та їхній короткий опис подані в додатку Б.

Використовуючи майстер побудови діаграм, можуть бути побудовані окремі залежності сили різання від елементів режиму різання (рисунок 21). Для цього необхідно вибрати тип діаграми «Крапкова діаграма» та у формі «Джерело даних» вказати в ролі «Значень X» клітинки з різними величинами обраного елемента режиму різання, а в ролі «Значень Y» клітинки з відповідними величинами сили різання. Отримана діаграма показує розташування окремих точок експериментальних даних. Для визначення x_p , y_p необхідно через ці точки провести лінію тренда, вибравши відповідну команду в контекстному меню, коли курсор перебуває на одній із точок даних на діаграмі. Необхідно вибрати:

- тип лінії тренда - «Ступенева»;
- параметри лінії тренда - «Показувати рівняння на діаграмі».

У результаті на побудованій діаграмі з'явиться плавна крива, побудована методом найменших квадратів, і її рівняння, так, як це, наприклад, показано на рисунку 21. Показник ступеня в рівнянні відповідає величинам у окремих залежностях x_p , y_p . Визначення C_p виконують аналогічно до того, як це описано в п. 7.1.

Практичне заняття 7. ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ОТРИМАНОГО РІВНЯННЯ ТА ДОВІРЧИЙ ІНТЕРВАЛ ВЕЛИЧИН СИЛИ, РОЗРАХОВАНОЇ ЗА ОТРИМАНИМ ЕМПІРИЧНИМ РІВНЯННЯМ

Отримане емпіричне рівняння необхідно перевірити на адекватність експериментальним даним. Як критерій у цьому випадку можна використати критерій Фішера

$$F = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_{on}^2} \leq F_{крит} , \quad (0.15)$$

де σ_{ad}^2 - дисперсія адекватності, що визначається за формулою

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (P(t_i, S_i) - \bar{P}_i)^2}{n_1 - r} . \quad (0.16)$$

σ_{on}^2 - дисперсія експерименту, r - кількість невідомих коефіцієнтів в емпіричному рівнянні;

$$\sigma_{on}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^N (P_{i,j} - \bar{P}_i)^2}{(N-1)n_1} , \quad (0.17)$$

де n_1 - загальна кількість дослідів; N - кількість повторень кожного дослідів; \bar{P}_i - математичне очікування величини сили різання.

Величина критичного значення функції Фішера $F_{крит}$ визначається за таблицею В.1 або може бути обчислена за допомогою функції Microsoft Excel «ФРАСПОБР» при заданому рівні значимості α і відомих ступенях свободи

- дисперсії адекватності емпіричного рівняння $f_1 = n_1 - r$;
- об'єднаної дисперсії плану експерименту $f_2 = n_1 (N - 1)$.

У розглянутому прикладі (див. табл. 4)

$N = 3$; $n_1 = 6$; $r = 3$; $\alpha = 0,05$; $F_{крит} = 3,49$ (табл. В. 1);

$$\sigma_{ad}^2 = 214476 \text{ Н}^2; \sigma_{on}^2 = 132116 \text{ Н}^2;$$

$$F = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_{on}^2} = \frac{214476}{132116} = 1,62 < F_{крит} = 3,49 .$$

Приклад виконання оцінки адекватності за допомогою Microsoft Excel показаний на рисунках 19 та 20.

Таким чином, критерій Фішера у розглянутому прикладі задовольняється. Отже, адекватність отриманої емпіричної залежності доведена.

Оскільки визначене емпіричне рівняння відображає вплив режиму різання лише на деяке середнє значення сили різання з якоюсь похибкою, то для практичного використання цієї залежності необхідно оцінити довірчий інтервал, тобто інтервал в якому найбільш імовірно буде знаходитись сила різання в реальному процесі.

Довірчий інтервал отриманої залежності можна оцінити, знаючи середнє квадратичне відхилення в заданій вибірці. Для цього визначається середнє квадратичне відхилення за дослідями з однаковими режимами різання

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (P_i - \bar{P})^2}{K - 1}} , \quad (0.18)$$

де K - загальна кількість повторень дослідів з однаковим режимом різання; \bar{P}_i - математичне очікування величини сили різання в цих дослідях.

Тоді довірчий інтервал дорівнює

$$\Delta P = \frac{t_{kp} \sigma_p}{\sqrt{N}}, \quad (0.19)$$

де t_{kp} - величина розподілу Стьюдента при числі ступенів свободи $f = K - 1$ та дорівнюють значимості α . Значення t_{kp} необхідно вибирати з таблиці В. 2 або за допомогою функції Microsoft Excel «СТЮДРАСПОБР», що дорівнюють значимості 2α . У розглянутому прикладі з таблиці 2 та 3 одержуємо $K = 6$ (табл. 5).

Таблиця 5 – Приклад розрахунку середнього квадратичного відхилення

Номер досліджу	s, мм/об	t, мм	P, Н	$P_i - \bar{P}$	$(P_i - \bar{P})^2$
1	0,3	2	4000	350	122500,000
2	0,3	2	4100	450	202500,000
3	0,3	2	3900	250	62500,000
4	0,3	2	4200	550	302500,000
5	0,3	2	2800	-850	722500,000
6	0,3	2	2900	-750	562500,000
		\bar{P}	3650	σ_p	628,490

Тоді з огляду на те, що при $\alpha=0.05$ і $f = 6 - 1 = 5$ $t_{kp} = 2.01$ одержуємо

$$\Delta P = \frac{2,01 \cdot 628,5}{\sqrt{6}} \approx 515 \text{ Н},$$

що становить 14% від математичного очікування сили \bar{P} .

Тоді результат експерименту повинен бути поданий у висновках по роботі таким чином

$$P_z = 5170 \cdot t^{0,96} \cdot S^{0,75} \pm 515 \text{ Н} (\pm 14\%).$$

7.4 Визначення поправочних коефіцієнтів

Вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, марки інструментального матеріалу, геометричних параметрів інструмента, складу МОТС і ряду інших факторів враховується, як правило, поправочними коефіцієнтами (0.14).

У даній роботі для визначення впливу на сили різання при точінні переднього кута γ і кута в плані φ проводяться третя й четверта серії дослідів. Для основного різця, що використовувався при проведенні першої й другої серії дослідів, значення відповідної складової сили різання береться за 100%, тобто поправочні коефіцієнти K_{γ_z} , K_{γ_y} , K_{γ_x} і K_{φ_z} , K_{φ_y} , K_{φ_z} для даного різця дорівнюватимуть 1. Для інших значень кутів (для інших різців) величини поправочних коефіцієнтів знаходяться шляхом відношення сил різання, що виникають при роботі цими різцями, до сили різання, отриманої при роботі основним різцем.

У довідкових матеріалах поправочні коефіцієнти для визначення умов обробки наводяться у вигляді таблиць, наприклад:

γ°	-10	0	10	20	φ°	30	45	60	90
K_{γ_z}	1,15	1,0	0,9	0,8	K_{φ_z}	1,	1,0	0,95	0,9

Практичне заняття 8. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Сила різання є інтегральним показником силової взаємодії інструмента із заготовкою і залежить від кількості матеріалу, що знімається в одиницю часу, величин пружних деформацій, пластичних деформацій в зонах первинної і вторинної деформацій, тертя на контактних ділянках передньої і задньої поверхонь леза інструмента. Треба мати на увазі, що:

1) збільшення / зменшення кількості матеріалу, що знімається в одиницю часу, і, в прешу чергу, площі зрізу ($f = t \cdot S = a \cdot b$, де a і b відповідно товщина і ширина зрізу) завжди супроводжується відповідно збільшенням/зменшенням як пружних, так і пластичних деформацій, а, отже, і сили різання;

2) об'єм пластичних деформацій у первинній зоні збільшується/зменшується, якщо збільшується/зменшується площа первинної зони стружкоутворення (зменшується/збільшується кут сколювання β_1). Наприклад, збільшення об'єму пластичних деформацій у зоні стружкоутворення має місце при збільшенні міцності оброблюваного матеріалу σ_b , товщини зрізу a , тобто подачі S та головного кута у плані φ ($a = S \cdot \sin \varphi$), кута різання δ , радіуса округлення різальної кромки ρ . Із збільшенням швидкості різання V , переднього кута γ , радіуса вершини леза r_b , твердості оброблюваного матеріалу НВ об'єм пластичних деформацій у зоні стружкоутворення зменшується;

3) із збільшенням/зменшенням об'єму деформацій у зоні стружкоутворення будуть збільшуватися/зменшуватися тиск стружки на передню поверхню, сила тертя F і розмір (товщина) зони вторинної деформації Δa_c (рис. 22). Товщина зони вторинної деформації Δa_c також суттєво залежить як від коефіцієнта тертя, а отже і від температури різання у зоні контакту стружки з передньою поверхнею, так і від її шорсткості. Із збільшенням коефіцієнта тертя μ , наприклад, при зміні марки інструментального матеріалу або швидкості різання (за рахунок теплових процесів і можливої при цьому зміни стану оброблюваного матеріалу у зоні його контакту з поверхнями на лезі інструмента, наприклад, часткового плавлення), шорсткості передньої поверхні R_a (R_z), а також усіх факторів, які призводять до збільшення об'єму деформацій у зоні стружкоутворення (σ_b , a , δ , ρ), об'єм пластичних деформацій у вторинній зоні, тобто її товщина Δa_c збільшується, і навпаки, із зменшенням коефіцієнта тертя μ , шорсткості передньої поверхні R_a (R_z), а також усіх факторів, які призводять до зменшення об'єму деформацій у зоні стружкоутворення (σ_b , a , δ , ρ), об'єм пластичних деформацій у вторинній зоні і її товщина зменшуються;

4) збільшення/зменшення об'єму пластичних деформацій у первинній зоні завжди супроводжується збільшенням/зменшенням як деформацій у поверхневому шарі нової поверхні, наприклад, у поверхні різання ($\Delta h'$ та $\Delta h''$), так і її пружного відновлення (Δh_{ne}), а відповідно з цим як нормальні сили і сила тертя (F_1) на задній поверхні леза (рис. 22);

5) збільшення/зменшення площі контакту робочих поверхонь леза інструмента зі стружкою і поверхнями на заготовці, наприклад, при зміні ширини і товщини зрізу, збільшують/зменшують сили тертя відповідно на передній (F) та задній (F_1) поверхнях, а тому і сили на них (Q і Q_1), і силу різання в цілому (див. рис. 1);

6) збільшення величини площадки зношування (h_3), а відповідно і площі контакту задньої поверхні з поверхнею різання також супроводжується збільшенням сили тертя (F_1).

Якщо потрібно пояснити вплив того чи іншого фактору на силу різання, треба:

1) розглянути, як із його зміною (збільшенням/зменшенням) буде змінюватися (збільшуватися/зменшуватися) кількість матеріалу, що знімається в одиницю часу;

2) розглянути, як із його зміною (збільшенням/зменшенням) буде змінюватися (збільшуватися/зменшуватися або навпаки) об'єм пластичних деформацій у зоні стружкоутворення (первинній зоні);

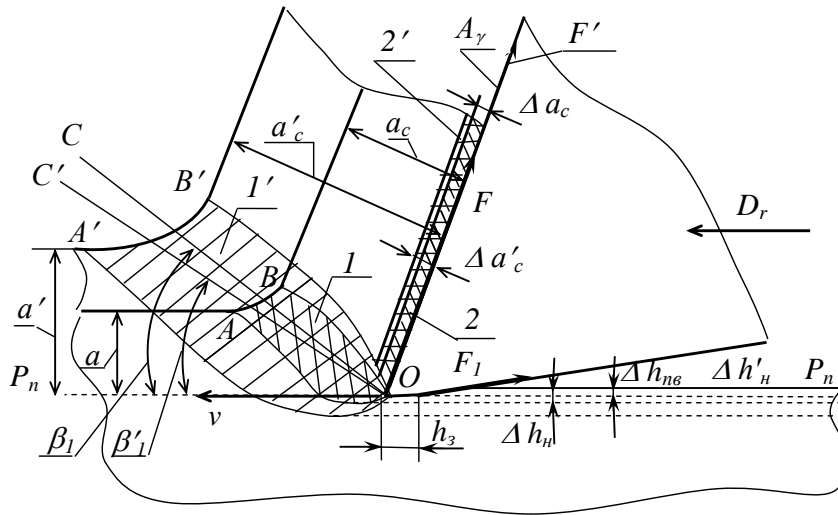


Рисунок 22 - Зміна зон первинної і вторинної деформацій із зміною товщини зрізу

3) розглянути, як при цьому буде змінюватися (збільшуватися /зменшуватися) тиск стружки на передню поверхню, а відповідно і сила тертя F , і розмір зони вторинної деформації Δa_c ;

4) розглянути, як буде змінюватися (збільшуватися/зменшуватися) питома вага зони вторинної деформації відповідно до товщини стружки a_c , тобто $\Delta a_c/a_c$, і відповідно сила на передній поверхні;

5) встановити, який із чинників (1-й, 3-й чи 4-й) переважає (превалює) і відіграє вирішальну роль у формуванні силової взаємодії леза із заготовкою: якщо будуть переважати 1-й або 3-й чинники, то величина сили на передній поверхні Q (див. рис. 1) буде залежати від напрямку їхньої зміни, якщо буде переважати 4-й чинник, то тоді він буде визначати напрям зміни сили Q ;

6) розглянути, як із його зміною (збільшенням/зменшенням) буде змінюватися (збільшуватися/зменшуватися) величина пружно-пластичного відновлення нової поверхні, а відповідно з цим і величини N_{1np} , N_{1nl} , F_1 та Q_1 ;

7) розглянути, як із його зміною (збільшенням/зменшенням) буде змінюватися (збільшуватися/зменшуватися) площа кон-такту леза інструмента з поверхнями на заготовці і відповідно сили тертя на них та сили на передній та задній поверхнях;

8) остаточно розглянути, як із його зміною (збільшенням/ зменшенням) буде змінюватися (збільшуватися / зменшуватися) величина сили різання P (з урахуванням зміни сил на передній Q і на задній Q_1 поверхнях), а відповідно і якоїсь її складової.

Примітка. При розгляді ступеня впливу на силу різання **першого, третього й четвертого чинників** (див. п.5), і явному превалюванні *першого* або *третього* чинника, все-таки ступінь їхнього впливу на силу на передній поверхні, а, отже, і на силу різання, може істотно залежати від характеру зміни (збільшення, зменшення або незмінності) *четвертого* чинника, тобто може змінюватися інтенсивність зміни сили різання.

Наприклад, відомо, що при різанні визначеного матеріалу сила різання росте зі збільшенням і подачі, і глибини різання, тому що зростає кількість матеріалу, що знімається в одиницю часу, (чинник 1), а, отже, і механічна енергія (робота), затрачувана на процес різання (див. [9]). Однак, незважаючи на їх абсолютно однаковий вплив на площу зрізу ($f = t \cdot S = a \cdot b$) і сили пружних деформацій N_{np} , їхній вплив на силу різання неоднаковий (рис. 23): глибина різання впливає більше, ніж подача.

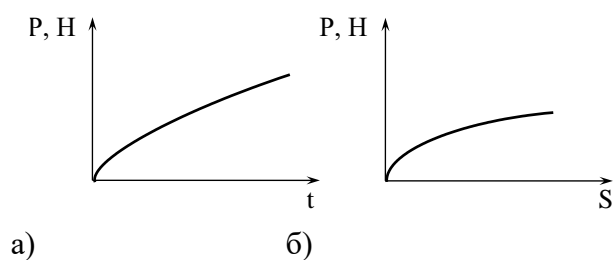


Рисунок 23– Вплив глибини різання (а) і подачі (б) на силу різання

У ролі прикладів розглянемо вплив на силу різання при точінні деяких факторів (подачі S і головного кута у плані φ , які мають практично однаковий вплив на товщину зрізу a ($a = S \sin \varphi$)).

Із збільшенням подачі за рахунок збільшення товщини зрізу ($a' > a$) об'єм матеріалу, що деформується в зоні стружкоутворення 1, збільшується ($1'$) (рис. 22), розміри зони стружкоутворення (ОАВ) зростають (ОА'В') і вона «повертається» у бік вектора швидкості різання v (кут сколювання зменшується ($\beta'_1 < \beta_1$)), тобто об'єм пластичних деформацій в зоні стружкоутворення (чинник 2) зростає, збільшується сила тиску стружки на передню поверхню, а відповідно і сила тертя ($F' > F$), і розмір зони вторинної деформації ($\Delta a'_c > \Delta a_c$) (чинник 3). Разом з тим, у зв'язку зі збільшенням товщини стружки $a'_c > a_c$ питома вага зони вторинної деформації зменшується ($\Delta a'_c / a' < \Delta a_c / a_c$) (див. [8], с.7,8), тобто зменшується питома вага деформацій у вторинній зоні (чинник 4), що сприяє зменшенню сили на передній поверхні. У даному випадку вирішальну роль у формуванні силової взаємодії передньої поверхні леза із зрізуваним шаром і стружкою чинники 2 і 3 превалюють над чинником 4, у результаті чого величина сили на передній поверхні Q зі збільшенням подачі зростає, але у меншій степені, ніж змінюється подача.

Треба відмітити, що не дивлячись на те, що при збільшенні подачі площа контакту задньої поверхні леза інструмента з поверхнею різання зростає майже незначно (чинник 7), так як не змінюється при цьому ширина зрізу, - сили на задній поверхні усе-таки збільшуються за рахунок збільшення величини пружно-пластичного відновлення нової поверхні (рис. 22), а відповідно з цим і величини N_{Inp} , N_{Inl} , F_1 та Q_1 (чинник б).

Примітка. Зі зміною як подачі, так і глибини різання площа контакту леза зі стружкою залишається практично однаковою, але *площа контакту задньої поверхні* з поверхнею різання при їхній зміні різна: зі зміною (збільшенням) глибини різання вона змінюється (зростає) прямо пропорційно цій зміні за рахунок збільшення ширини зрізу ($b = \frac{t}{\sin \varphi}$), а зі змі-

ною (збільшенням) подачі вона залишається практично незмінною (див. [9], с. 10,11). Цю обставину необхідно враховувати й при розгляді питання «Який з факторів (глибина різання чи подача) має більший (менший) вплив на силу різання?»

Остаточню, з урахуванням характеру зміни сил на передній Q та задній Q_1 поверхнях, можна зробити висновок, що при збільшенні подачі сила різання зростає, але у меншій степені, ніж змінюється подача.

При розгляді ступеня впливу на силу різання геометричних параметрів леза інструмента необхідно враховувати, що їхня зміна хоч і не впливає на площу зрізу, а, отже, і на об'єм матеріалу, що знімається в одиницю часу (при незмінній швидкості різання), але все-таки істотно може впливати на характер силової взаємодії інструмента з оброблюваною деталлю. Наприклад, зі збільшенням головного кута в плані φ при незмінній площі зрізу ($f = t \cdot S$) (чинник 2), з одного боку, зростає об'єм деформацій як у первинній, так і у вторинній зонах за рахунок збільшення товщини зрізу ($a' > a$), що сприяє збільшенню сил як на передній Q , так і на задній Q_1 поверхнях (чинники 3 і б), але, з іншого боку, зменшується питома вага деформацій у вторинній зоні ($\Delta a'_c / a' < \Delta a_c / a_c$) (чинник 4), що сприяє зменшенню сил на передній поверхні Q . Експериментально доведено, що при $r_e = 0$ зі збільшенням головного кута в плані φ сила

різання (головна складова сили різання P_z) зменшується (мал. 24), тобто *чинник* 4 превалює над *чинниками* 3 і 6.

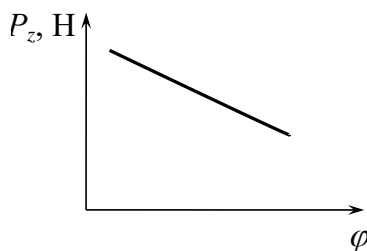


Рисунок 24 – Вплив головного кута у плані φ на силу різання

9. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

- Ознайомитися із правилами техніки безпеки при виконанні роботи.
- Ознайомитися з методами вимірювання сил різання.
- Ознайомитися з устроєм та принципом дії механічних (пружно-механічних) динамометрів.
- Ознайомитися з устроєм та принципом дії гідравлічних динамометрів.
- Ознайомитися з устроєм та принципом дії пружно-електричних (електричних) пружно-електричних (електричних).
- Ознайомитися із устроєм і принципом дії динамометра УМД-600.
- Записати в журналі дані про верстат і динамометр УДМ-600.
- Записати дані про заготовку (марка матеріалу, зовнішній діаметр).
- Зробити вимірювання та записати дані про різці (тип, матеріал різальної частини, кути леза).
- Записати частоту обертання шпинделя та підрахувати швидкість різання.
- Показати схеми сил, що діють на лезо і різець.
- Показати схему вимірювання і реєстрації сил різання за допомогою УДМ.
- Зробити послідовно 1,2,3,4 серії дослідів і показання приладів занести у відповідні колонки табл. 1-4.
- За допомогою тарувальних графіків визначити значення складових сили різання в кожному досліді.
- За результатами дослідів 1-ої і 2-ої серій побудувати графіки залежностей складових сили різання від t і S у подвійній логарифмічній системі координат (див. додаток А).
- Зробити математичну обробку дослідних даних 1-ї і 2-ї серій дослідів: для однієї складової сили різання (за завданням викладача) – графоаналітичним методом, для другої – методом найменших квадратів (рішення систем рівнянь), для третьої методом найменших квадратів на ЕОМ. Всі розрахунки, пов'язані з виводом узагальнених залежностей P_z , P_y , $P_x=f(t,S)$, занести в журнал.
- Визначити поправочні коефіцієнти K_γ і K_φ , їхні значення занести в табл.3 і 4 додатка А.
- Проаналізувати отримані результати. Установити та пояснити характер і ступінь впливу на сили кожного з факторів.
- Поставити дату, підпис і подати звіт на затвердження викладачеві.

10 Зміст звіту

- 1 Дані про обладнання, прилади, заготовку та різальний інструмент.
- 2 Таблиця з вимірами кутів різця.
- 3 Схеми діючих на лезо і різець сили різання.
- 4 Схема вимірювання та реєстрації сил різання
- 5 Таблиця з вимірами та значеннями складових сил різання P_z , P_y , P_x .

- 6 Графіки та частинні залежності для всіх складових сили різання $P_z, P_y, P_x = f(t); P_z, P_y, P_x = f(S)$.
- 7 Поправочні коефіцієнти на вплив переднього кута й головного кута в плані на сили різання.
- 8 Всі графіки та розрахунки, пов'язані з визначенням залежностей $P_z, P_y, P_x = f(t, S, \gamma, \varphi)$ графоаналітичним методом і методом найменших квадратів. Бланки вихідних даних і результатів розрахунку на ЕОМ.
- 9 Пояснення отриманих залежностей складових сили різання від елементів режиму різання та геометрії інструмента і загальні висновки по роботі.
- 10 Дата виконання роботи та підпис звіту викладачем.
- 11 *Примітка.* Форма звіту наведена в додатку А.

11 Питання для самоперевірки

- 1 Наведіть і поясніть схему сил, що діють на різальний клин і різець у процесі різання.
- 2 Дайте характеристику складових сили різання.
- 3 Охарактеризуйте устрій і принцип дії механічних динамометрів.
- 4 Охарактеризуйте устрій і принцип дії гідравлічних динамометрів.
- 5 Охарактеризуйте устрій і принцип дії електричних динамометрів.
- 6 Охарактеризуйте устрій і принцип дії динамометра УДМ-600
- 7 Напишіть формули, наведіть графіки та поясніть частинні залежності $P_z, P_y, P_x = f(t); P_z, P_y, P_x = f(S)$.
- 8 Напишіть і поясніть узагальнені залежності складових сили різання P_z, P_y, P_x від елементів режиму різання та геометрії інструмента.
- 9 Як визначити постійну C_p і показники x_p і y_p графоаналітичним методом?
- 10 Як визначити поправочні коефіцієнти $K_{\gamma p}$ і $K_{\varphi p}$?
- 11 Як визначити постійну C_p і показники x_p і y_p методом найменших квадратів?
- 12 Наведіть алгоритми розрахунку коефіцієнтів і показників ступенів.
- 13 Поясніть вплив глибини різання t на силу різання.
- 14 Поясніть вплив подачі S на силу різання.
- 15 Який з факторів t або S має більший (менший) вплив на силу різання і чому?
- 16 Поясніть вплив кутів γ і φ на силу різання.

12 Типові тести для самоконтролю та модульного контролю знань

1 Сила різання - це результат

- 1) додавання сил на передній поверхні;
- 2) тільки тертя на задній поверхні;
- 3) додавання сил на задній поверхні;
- 4) тільки пружних і пластичних деформацій;
- 5) правильної відповіді немає.

2 Сила різання - це результат:

- 1) тільки тертя на передній поверхні;
- 2) тільки тертя на задній поверхні;
- 3) тільки деформацій у зоні стружкоутворення;
- 4) тільки деформацій у первинній і вторинній зонах;
- 5) правильної відповіді немає.

3 Сила різання - це результат:

- 1) додавання сил на передній поверхні;
- 2) тертя на задній поверхні;
- 3) додавання сил на передній і задній поверхнях;
- 4) пружних і пластичних деформацій;
- 5) правильної відповіді немає;

4 Сила різання - це результат:

- 1) додавання сил на передній поверхні;
- 2) тертя на передній і задній поверхнях;
- 3) тільки деформацій у зоні стружкоутворення;
- 4) деформацій у первинній і вторинній зонах;
- 5) правильної відповіді немає.

5 За силою R_z визначають:

- 1) точність обробки;
- 2) міцність механізму подачі;
- 3) потужність різання;
- 4) потужність привода подачі;
- 5) правильної відповіді немає.

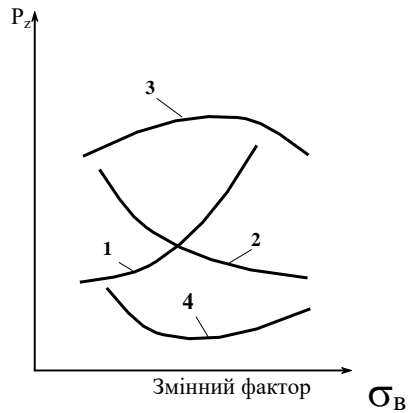
6 За силою R_y визначають:

- 1) точність обробки;
- 2) міцність механізму подачі;
- 3) потужність різання;

- 4) потужність привода подачі;
5) правильної відповіді немає.
- 7 За силою P_x визначають:**
- 1) точність обробки;
 - 2) міцність механізму подачі;
 - 3) потужність різання;
 - 4) потужність привода подачі;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 8 Як зміниться сила P_x зі зменшенням головного кута в плані?**
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) практично не зміниться;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 9 Як зміниться сила P_y зі зменшенням головного кута в плані?**
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) практично не зміниться;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 10 Як зміниться сила P_x зі збільшенням головного кута в плані?**
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) практично не зміниться;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 11 Який з факторів найбільше впливає на силу різання?**
- 1) швидкість різання;
 - 2) глибина різання;
 - 3) подача;
 - 4) практично однакове;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 12 Який з факторів найменше впливає на силу різання?**
- 1) швидкість різання;
 - 2) глибина різання;
 - 3) подача;
 - 4) практично однакове;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 13 Який з факторів найбільше впливає на силу різання?**
- 1) глибина різання;
 - 2) подача;
 - 3) практично однакове;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 14 Який з факторів найменше впливає на силу різання?**
- 1) глибина різання;
 - 2) подача;
 - 3) практично однакове;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 15 Як зміниться сила P_y зі збільшенням головного кута в плані?**
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) практично не зміниться;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 16 При $\varphi=45^\circ$, $r_s=0$, $\lambda=0^\circ$ і $h_z=0$ співвідношення $P_z : P_y : P_x$ становить:**

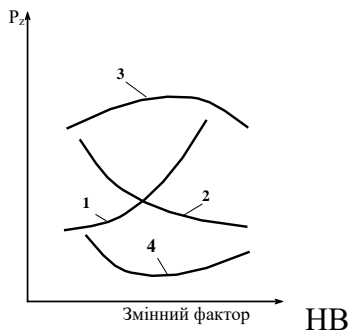
- 1) 1:1: 1;
- 2) 1:0,6:0,5;
- 3) 1:0,3:0,4;
- 4) правильної відповіді немає.

17 Залежність сили різання від міцності оброблюваного матеріалу



- 5) правильної відповіді немає.

18 Залежність сили різання від твердості оброблюваного матеріалу



- 5) правильної відповіді немає.

19 Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу сила різання:

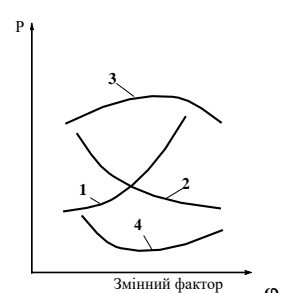
- 1) збільшується;
- 2) зменшується;
- 3) практично не змінюється;
- 4) правильної відповіді немає.

20 Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу сила різання:


- 1) збільшується;
- 2) зменшується;
- 3) практично не змінюється;
- 4) правильної відповіді немає.

21

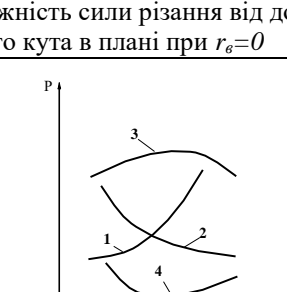
Залежність сили різання від головного кута в плані при $r_e=0$	У зв'язку зі
----------------------------------------------------------------	--------------

 <p>Змінний фактор φ</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням довжини криволінійної ділянки різальної кромки; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; e) правильної відповіді немає</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

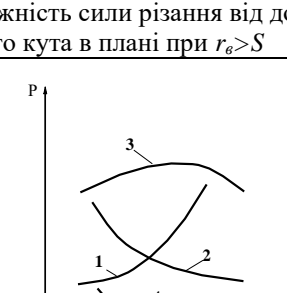
22

<p>Залежність сили різання від головного кута в плані при $r_e > 0$</p>  <p>Змінний фактор φ</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>У зв'язку зі</p> <p>a) зменшенням товщини зрізу; b) зменшенням довжини криволінійної ділянки різальної кромки; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; e) правильної відповіді немає</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

23

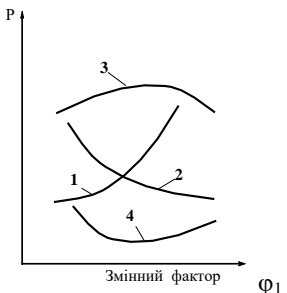
<p>Залежність сили різання від допоміжного кута в плані при $r_e = 0$</p>  <p>Змінний фактор φ_1</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>У зв'язку зі</p> <p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) зменшенням об'єму зрізуваного матеріалу; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

24

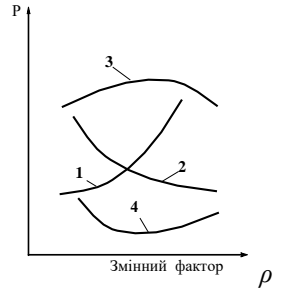
<p>Залежність сили різання від допоміжного кута в плані при $r_e > S$</p>  <p>Змінний фактор φ_1</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>У зв'язку зі</p> <p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) зменшенням об'єму зрізуваного матеріалу; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

25

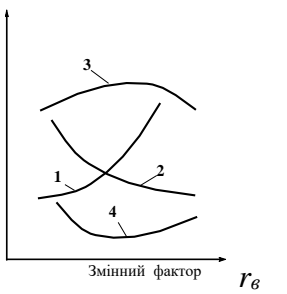
<p>Залежність сили різання від допоміжного кута в плані при $r_e < S$</p>	<p>У зв'язку зі</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------	---------------------

 <p>Змінний фактор φ_1</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) зменшенням об'єму зрізуваного матеріалу; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

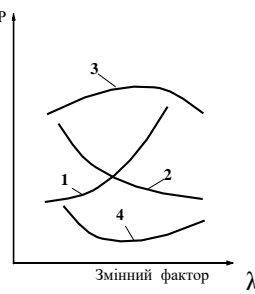
26

<p>Залежність сили різання від радіуса округлення різальної кромки</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>Змінний фактор ρ</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає</p>

27

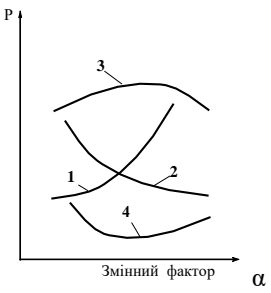
<p>Залежність сили різання від радіуса вершини леза</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>Змінний фактор r_b</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) збільшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) збільшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; e) правильної відповіді немає</p>

28

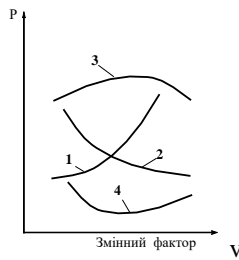
<p>Залежність сили різання від кута нахилу різальної кромки</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>Змінний фактор λ</p> <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) збільшенням швидкості деформації; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>

29

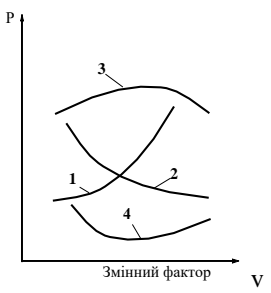
<p>Залежність сили різання від заднього кута</p>	<p>У зв'язку зі</p>
--------------------------------------------------	---------------------

 <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) збільшенням сили тертя; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

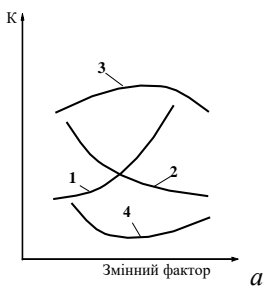
30

<p>Залежність сили різання від швидкості різання в умовах відсутності наросту</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зміною переднього кута; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>

31

<p>Залежність сили різання від швидкості різання в умовах наросту-ворення</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зміною переднього кута; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>

32

<p>Залежність сили різання від товщини зрізу</p>	<p>У зв'язку зі</p>
 <p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням сили тертя; b) зменшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>

33

<p>Залежність сили різання від глибини різання</p>	<p>У зв'язку зі</p>
----------------------------------------------------	---------------------

<p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) збільшенням товщини зрізу; b) зменшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає</p>
--------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

34

Залежність сили різання від подачі	У зв'язку зі
<p>5) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) зменшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) збільшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; e) правильної відповіді немає</p>

35

Зі зменшенням переднього кута сила різання	У зв'язку зі
<p>1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) зменшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням кута різання; e) правильної відповіді немає</p>

36

Зі зменшенням кута різання сила різання	У зв'язку зі
<p>1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає</p>	<p>a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає</p>

37

Зі зменшенням головного кута в плані сила різання при $r_b=0$	У зв'язку зі
<p>1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає</p>	<p>a) збільшенням товщини зрізу; b) зменшенням ширини зрізу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) збільшенням питомої ваги дефор-</p>

	мацій у зоні вторинної деформації; е) правильної відповіді немає
--	---------------------------------------------------------------------

38

Зі зменшенням головного кута в плані сила різання при $r_b > 0$	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) збільшенням товщини зрізу; б) зменшенням ширини зрізу; в) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; г) збільшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; д) правильної відповіді немає

39

Зі зменшенням допоміжного кута в плані сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) зменшенням товщини зрізу; б) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; в) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; г) зменшенням переднього кута; д) правильної відповіді немає

40

Зі зменшенням радіуса округлення різальної кромки сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) збільшенням головного кута в плані; б) збільшенням переднього кута; в) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; г) збільшенням питомої ваги криволінійної ділянки різальної кромки; д) правильної відповіді немає

41

Зі зменшенням радіуса вершини леза сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) збільшенням головного кута в плані; б) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; в) зменшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; г) збільшенням питомої ваги криволінійної ділянки різальної кромки; д) правильної відповіді немає

42

Зі зменшенням кута нахилу різальної кромки сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) збільшенням швидкості деформації; б) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; в) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; г) локалізацією деформацій; д) правильної відповіді немає

43

Зі зменшенням заднього кута сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	а) збільшенням швидкості деформації; б) зменшенням об'єму зрізаного матеріалу; в) зменшенням об'єму деформованого

	матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------

44

Зі зменшенням швидкості різання в умовах відсутності наросту сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	a) зміною переднього кута; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає

45

Зі зменшенням швидкості різання в умовах наростоутворення сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	a) зміною переднього кута; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає

46

Зі зменшенням товщини зрізу сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	a) збільшенням швидкості деформації; b) зменшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; c) зменшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає

47

Зі зменшенням глибини різання сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	a) зменшенням товщини зрізу; b) зменшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) зменшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) локалізацією деформацій; e) правильної відповіді немає

48

Зі зменшенням подачі сила різання	У зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає	a) збільшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізаного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням питомої ваги деформацій у зоні вторинної деформації; e) правильної відповіді немає

49

Залежність сили різання від переднього кута	У зв'язку зі
---------------------------------------------	--------------

<p>5) правильної відповіді немає</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням кута різання; e) правильної відповіді немає
--------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

50

Залежність сили різання від кута різання	У зв'язку зі
<p>5) правильної відповіді немає</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) зменшенням товщини зрізу; b) збільшенням об'єму зрізуваного матеріалу; c) збільшенням об'єму деформованого матеріалу в зоні первинної деформації; d) зменшенням переднього кута; e) правильної відповіді немає

Додаток А
(обов'язковий)

Форма звіту

Робота «Дослідження сил різання при точінні із застосуванням ЕОМ»

2 Вихідні дані

Верстат:

- 1 Найменування, тип: _____.
- 2 Частота обертання шпинделя від _____ до _____ об/хв.
- 3 Подача від _____ до _____ мм/об.

Динамометр:

- 1 Найменування, тип _____.
- 2 Граничні значення сил різання, що допускаються міцністю динамометра:
 - а) тангенціальна складова $P_z < \text{_____ Н}$;
 - б) радіальна складова $P_y < \text{_____ Н}$;
 - в) осьова складова $P_x < \text{_____ Н}$.

Заготовка:

- 1 Матеріал _____.
- 2 Зовнішній діаметр $D = \text{_____ мм}$.

Різці:

- 1 Тип, матеріал ріжучої частини _____.
- 2 Геометрія ріжучої частини (леза) різців: $\alpha = \text{_____}^\circ$;
 $\alpha_1 = \text{_____}^\circ$; $\varphi_1 = \text{_____}^\circ$; $\lambda = \text{_____}^\circ$; $r = \text{_____ мм}$.

Номер різця	1	2	3	4	5	6	7	8	9
γ°									
φ°									

Частота обертання шпинделя та швидкість різання:

$$n = \text{_____ об/хв}; \quad v = \frac{\pi D n}{1000} = \text{_____} = \text{_____ м/хв}.$$

2 Схема сил, що діють на лезо та різець.

3 Схема вимірювання та реєстрації сил різання.

4 Результати вимірювання складових сили різання:

Продовження додатка А

1-я серія дослідів

Таблиця 1 – Вплив глибини різання на складові сили різання ($S = \text{_____ мм/об}$)

$t, \text{ мм}$	Показання приладів, mA			Сила різання, H		
	A_z	A_y	A_x	P_z	P_y	P_x

Графіки 1 – $P_z, P_y, P_x = f(t)$;

2-я серія дослідів

Таблиця 2 – Вплив подачі на силу різання ($t = \text{_____ мм}$)

$S, \text{ мм/об}$	Показання приладів, mA			Сила різання, H		
	A_z	A_y	A_x	P_z	P_y	P_x

Графіки 2 – $P_z, P_y, P_x = f(S)$;

3-я серія дослідів

Таблиця 3 -Вплив переднього кута γ на силу різання
($S=$ ___ мм/об, $t=$ ___ мм)

$\gamma, ^\circ$	Показання приладів, mA			Сила різання, Н		
	A_z	A_y	A_x	P_z	P_y	P_x

Графіки 3 - $P_z, P_y, P_x = f(\gamma)$;

4-я серія дослідів

Таблиця 4 - Вплив головного кута в плані φ на силу різання

($S=$ ___ мм/об, $t=$ ___ мм)

$\varphi, ^\circ$	Показання приладів, mA			Сила різання, Н		
	A_z	A_y	A_x	P_z	P_y	P_x

Продовження додатка А

Графіки 4 - $P_z, P_y, P_x = f(\varphi)$;

5 **Математична обробка результатів дослідів.**

Роздруківка аркуша Microsoft Excel з розрахунком параметрів емпіричних залежностей, перевіркою їх адекватності та їх довірчого інтервалу.

6 **Аналіз результатів експериментів і загальні висновки по роботі.**

7 **Висновки.**

Додаток Б
(довідковий)
ПЕРЕЛІК СТАНДАРТНИХ ФУНКЦІЙ
MICROSOFT EXCEL,
ВИКОРИСТОВУВАНИХ У ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ

СРЗНАЧ - середнє значення в діапазоні клітинок

$$\text{СРЗНАЧ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

СУММ - сума значень у діапазоні клітинок

$$\text{СУММ} = \sum_{i=1}^n X_i .$$

СТАНДОТКЛОН - середнє квадратичне відхилення в діапазоні клітинок

$$\text{СТАНДОТКЛОН} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} .$$

СТЕПЕНЬ(A;B) – число A в ступені B

$$\text{СТЕПЕНЬ} (A;B) = A^B .$$

ФРАСПОБР(α ; f_1 ; f_2) - повертає зворотнє значення X для F-розподілу Фішера ймовірностей (рівнів значимості) α , так що $\alpha = F(X, f_1, f_2)$, f_1, f_2 – ступеня свободи, причому $f_1 < f_2$.

СТЬЮДРАСПОБР(α ; f) - повертає t -значення двостороннього розподілу Стьюдента як функцію ймовірності (рівня значимості) α і числа ступенів свободи f .

Додаток В
(довідковий)

Таблиця В.1 – Деякі значення функції Фішера (F-критерію) для рівня значимості $\alpha=0.05$

$n_1(N-1)$	$n_1 - r$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
1	161,45	199,5	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	245,95
2	18,51	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,35	19,37	19,38	19,4	19,43
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,7
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6	5,96	5,86
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,62
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,1	4,06	3,94
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,51
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,5	3,44	3,39	3,35	3,22
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,01
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,85
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,2	3,09	3,01	2,95	2,9	2,85	2,72
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3	2,91	2,85	2,8	2,75	2,62
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,53
14	4,6	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,7	2,65	2,6	2,46
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,4

Таблиця В.2 - Деякі значення функції одностороннього t-розподілу Стюдента

f	Рівень значимості α		
	0.10	0.05	0.01
1	3,0777	6,3137	31,8210
2	1,8856	2,9200	6,9645
3	1,6377	2,3534	4,5407
4	1,5332	2,1318	3,7469
5	1,4759	2,0150	3,3649

Список літератури

1. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент.- М.: Машиностроение, 1968. – 394 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. -М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Вульф А.М. Резание металлов.- Львів: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. -М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
5. Филоненко С.Н. Резание металлов.– Киев: Техніка, 1975.- 232с.
6. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент.-Минск: Высшая школа, 1975. – 528с.
7. Конспект лекції з курсу «Теорія різання» на тему «Терміни та визначення основних понять» /Укладач В.О. Залога. – Суми: Вид-во СумДУ, 2004.- 35 с.
8. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження деформації зрізаного шару та стружки при точінні» з курсу «Теорія різання»/Укладач В.О. Залога. – Суми: Вид-во СумДУ, 2005. - 19 с.
9. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження температури різання при точінні» з курсу «Теорія різання»/Укладачі: В.О. Залога, Д.В. Криворучко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. - 47 с.