

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 621.914.5:621.9.015

## СИЛОВЕ ПОЛЕ ШНЕКОВОЇ ЗУБОРІЗНОЇ ФРЕЗИ ТА ЙОГО КІЛЬКІСНА ОЦІНКА

© Грицай І.С., Ситнік В.В., 1999

ДУ «Львівська політехніка», кафедра «Технологія машинобудування»

Розроблена математична модель силового поля та динаміки процесу, а також оцінки його нерівномірності у функції від миттєвих значень параметрів зрізів шнекової фрези. Виведено залежності для розрахунку складових сили різання та крутного моменту на кожному зубці та окремому лезі шнекової фрези з врахуванням тертя по передній та задній поверхнях і умов невеликого різання. Розроблено метод комплексного експериментального дослідження нарізання зубчастих коліс шнековими фрезами з можливістю диференційованого вивчення роботи утворення стружки та різання окремими зубцями та лезами. Наведені результати експериментального дослідження процесу, що порівнюються із теоретичними значеннями на основі моделі.

Розроблення математичної моделі силових факторів, що супроводжують процеси нарізання циліндричних зубчастих коліс шнековими фрезами, має важливе значення для удосконалення даних процесів, оскільки дозволяє на стадії проектування отримувати оптимальні технологічні рішення – знаходити раціональні режими різання, прогнозувати точність оброблення, стійкість шнекових фрез, планувати потреби у різальному інструменті. Значення цієї задачі підвищується для технологічних процесів виготовлення великомодульних зубчастих коліс, а також при використанні нестандартних та модифікованих шнекових фрез і нових схем різання, оскільки у цих випадках дозволяє обійтися без вартісних експериментальних та натурних досліджень.

Різання шнековою фрезою є складним та особливим процесом. Його специфіка полягає в тому, що у кожен мить різання у роботі бере участь одночасно декілька зубців, які утворюють рейку; кількість активних зубців на різних рейках є різною. У різних зубців, залежно від місця кожного з них на робочій довжині фрези, завантаженими можуть бути одне, два або три леза одночасно, при цьому довжина дуги контакту із заготовкою для кожного з лез теж є різною. Дані особливості необхідно враховувати для розрахунків сили різання, а це можливо на основі відображення сили різання як функції площі поперечного перетину зрізів і питомої сили різання за умов наявності достовірної моделі самих параметрів зрізів. У роботі [1] миттєва сила на кожному лезі як елементарна складова сили різання розглядається у вигляді вектора, величина і

напрямок якого циклічно змінюються під час оброблення згідно із законом зміни миттєвої площі поперечного перетину зрізів. Площу поперечного перетину  $f$ , як і інші параметри зрізів, визначають диференційовано на кожному окремому лезі у послідовних фазах обкочування за допомогою графоаналітичної моделі [1,2]. При такому підході створюються передумови, щоб розглядати навантаження на шнекову фрезу та заготовку у вигляді просторового силового поля, яке утворене спільною дією елементарних миттєвих сил, що виникають на усіх лезах і усіх зубцях шнекової фрези, які беруть участь у різанні у кожний момент часу. Тоді миттєве значення  $dP_0$  головної складової  $P_0$  сили різання на окремому лезі буде дорівнювати добутку миттєвої площі поперечного перетину  $dS_n$  на питому силу різання:

$$dP_0 = p \cdot dS_n. \quad (1)$$

Використання для розрахунків сил та моментів питомої сили широко розповсюджене у теорії різання для різних методів оброблення деталей машин і дає задовільні результати, але точність розрахунків залежить від визначення питомої сили різання.

Площа поперечного перетину зрізу як фактор сили різання має певну особливість. Відомо, що різання є глибоким пластичним деформуванням або крихким руйнуванням, що відбувається в умовах деформації зсувом, а основні деформаційні процеси відбуваються в умовній площині зсуву. Площа зсуву зв'язана із площею поперечного перетину зрізу, яка, в свою чергу, є функцією двох параметрів – товщини “а” та ширини “b” зрізу. Впливаючи через зміну параметрів  $a$  і  $b$  на площу зсуву, площа поперечного перетину зрізу тим самим впливає на процеси деформування металу під час різання та силу різання. Оскільки миттєва площа поперечного перетину зрізу і площа зсуву зв'язані між собою кутом зсуву  $\Phi$ , то характер впливу товщини і ширини зрізів на площу зсуву є різними. Якщо зміна параметра “b” не впливає на кут зсуву, то збільшення або зменшення товщини зрізу, спричиняючи відповідну зміну площі зсуву, одночасно призводить до зміни кута  $\Phi$  і положення площини максимальних дотичних напружень. Наприклад, коли зростає товщина зрізу, збільшуються площа зрізу, кут і площа зсуву, разом з тим зростає сила зсуву, але одночасно зменшується відносний зсув, що приводить до зменшення відносної сили різання. Тому залежність між величинами  $P_r$  і “a” не є прямо пропорційною, а такою, при якій дана сила відстає від збільшення параметра “a”.

Численні експерименти із силами різання для різних методів оброблення вказують на значення показників степеня у залежностях, де ця сила відтворена функцією товщини та ширини зрізів. Цей показник при ширині зрізу дорівнює одиниці, що відповідає прямо пропорційному впливу на силу різання, а для товщини зрізу його значення є меншим від одиниці. Наприклад, у формулі для сили різання фрезерування показник степеня  $x$  при параметрі “a” лежить у діапазоні 0,29-0,36 для сталей та 0,33-0,4 – для чавунів; за даними одинадцяти авторів [3] середній показник степеня при товщині зрізів для точіння дорівнює 0,75. Проте вказані значення даного показника відображають дійсну картину лише при товщині зрізу, більшій від одиниці. Якщо ж товщина зрізу є меншою, ніж один міліметр, то при вказаних значеннях параметра “x”

розрахункова сила різання не відстає від товщини зрізу, а випереджає її, при цьому результати розрахунків вступають у протиріччя з фактичними значеннями і не узгоджуються з експериментальними даними. Цей висновок стосується зубофрезерування шнековими фрезами, бо при обробленні середньомодульних зубчастих коліс з модулем до 8 мм у всьому діапазоні осьових подач товщина зрізів на лезах є співмірною з подачею на зуб інструмента і знаходиться в межах 0,01...0,9 мм

Аналіз можливих значень показників степеня при товщині зрізу та залежностей для описання сили різання, яка відповідала б специфіці шнекового зубофрезерування, засвідчив, що найповніше наведеним вище умовам відповідає функція вигляду:

$$P_0 = p \cdot S \cdot e^{-a}, \quad (2)$$

де  $S$  і  $a$  – відповідно, площа поперечного перетину та товщина зрізу;  $e$  – основа натурального логарифма. Порівняльна характеристика функцій  $y = a \cdot e^{-a}$  та  $y = a^{0.75}$  для товщин зрізів менше ніж 1 мм наведена на рис.1.

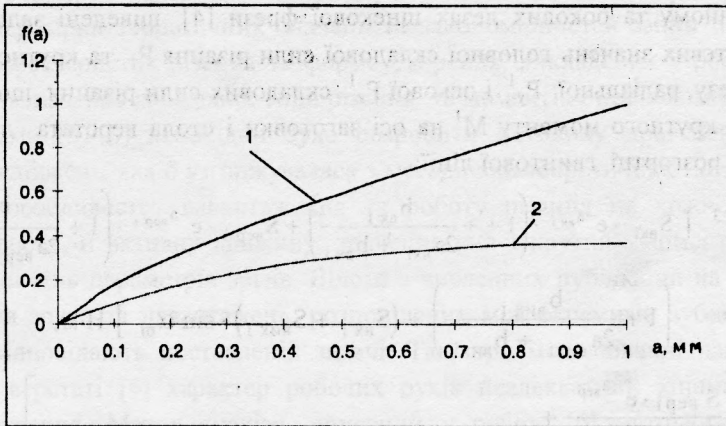


Рис.1. Характер впливу товщини зрізу на силу різання.

Моделювання сили різання та крутного моменту на основі миттєвих параметрів зрізів дозволяє врахувати сили тертя на передній поверхні та у місцях контакту інструмента з обробленою поверхнею, кінематичні кути фрези і сили взаємодії Г- та П-подібних стружок в умовах невідного різання. Зростання сили різання внаслідок сили тертя між задньою поверхнею інструмента та обробленою поверхнею і внаслідок взаємодії стружок, які утворюються на суміжних лезах шнекової фрези, можна врахувати на основі таких міркувань.

1. Відомо, що сила тертя по задній поверхні інструмента пропорційна ширині різання [3], тому її значення можна врахувати додатковою складовою:

$$F_{il} = P_i \cdot \frac{b_i}{2a_i + b_i}, \quad (3)$$

де другий множник характеризує частку ширини зрізу у периметрі різання для кожного окремого леза фрези.

2. Силу деформації стружок, які сходять одночасно з вершинного та бокового лез в умовах невідного різання, можна розглядати як додаткову силу тертя на передній

поверхні, а її значення буде дорівнювати геометричній сумі сил тертя, що діють біля вхідного і вихідного кутників вершинного леза [4]. Зростання сили різання внаслідок деформацій, що виникають між Г- та П-подібними стружками, можна врахувати додатковою складовою  $F_{i2}$ , що дорівнює:

$$F_{i2} = P_i \cdot (S_{\text{вх}i} + S_{\text{вих}i}) \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \quad (4)$$

Оскільки обов'язковою умовою виникнення Г- або П-подібних стружок є участь у різанні вершинного леза, яке, при цьому, виконує найбільшу роботу стружкоутворення, то у першому наближенні силу взаємодії між суміжними стружками можна знайти як проекцію сили тертя на вершинному лезі на бокові леза:

$$F_{i2} = 2 \cdot P_i \cdot \text{tg} \rho \cdot \sin \alpha_{\text{ш}}, \quad (4')$$

де  $\rho$  – кут тертя на передній поверхні в умовах пружної взаємодії;  $\alpha_{\text{ш}}$  – кут профілю вихідного контуру.

На основі функцій (2)-(4'), а також, приймаючи до уваги значення кінематичних кутів на вершинному та бокових лезах шнекової фрези [4], виведені залежності для розрахунків миттєвих значень головної складової сили різання  $P_r$  та крутного моменту  $M$ , що діє на фрезу, радіальної  $P_y^1$  і осьової  $P_z^1$  складових сили різання, що впливають на заготовку, та крутного моменту  $M^1$  на осі заготовки і стола верстата для кожного леза та зубця на розгортці гвинтової лінії:

$$M = p \cdot R_{\text{аф}} \cdot 10^{-3} \cdot \left[ S_{\text{вх}i} \cdot e^{-a_{\text{вх}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вх}i}}{2a_{\text{вх}i} + b_{\text{вх}i}} \right) + S_{\text{вєр}i} \cdot e^{-a_{\text{вєр}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вєр}i}}{2a_{\text{вєр}i} + b_{\text{вєр}i}} \right) + S_{\text{вєр}i} \cdot e^{-a_{\text{вих}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вих}i}}{2a_{\text{вих}i} + b_{\text{вих}i}} \right) + (S_{\text{вх}i} + S_{\text{вих}i}) \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \right] \text{Н} \cdot \text{м}; \quad (5)$$

$$P_y^1 = p \cdot \text{tg} \rho \cdot \left[ \frac{S_{\text{вєр}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вєр}i}}}{\cos \gamma_{\text{вєр}i}} + \left( \frac{S_{\text{вх}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вх}i}}}{\cos \gamma_{\text{вх}i}} + \frac{S_{\text{вих}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вих}i}}}{\cos \gamma_{\text{вих}i}} + S_{\text{вх}i} + S_{\text{вих}i} \right) \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \right] \text{Н}; \quad (6)$$

$$P_x^1 = p \cdot \left[ S_{\text{вх}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вх}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вх}i}^1}{2a_{\text{вх}i}^1 + b_{\text{вх}i}^1} \right) + S_{\text{вєр}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вєр}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вєр}i}^1}{2a_{\text{вєр}i}^1 + b_{\text{вєр}i}^1} \right) + S_{\text{вих}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вих}i}} \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{вих}i}^1}{2a_{\text{вих}i}^1 + b_{\text{вих}i}^1} \right) + (S_{\text{вх}i}^1 + S_{\text{вих}i}^1) \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \right] \text{Н}; \quad (7)$$

$$M_{\text{кр}i} = p \cdot 10^{-3} \cdot S_{\text{вх}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вх}i}} \cdot [\text{tg}(\rho - \gamma_{\text{вх}i}) + \sin \alpha_{\text{ш}}] \times$$

$$\times \left[ \left( R_f + \frac{b_{\text{вх}i}^1}{2} \cdot \cos \alpha_{\text{ш}} \right) + \left( L_i + \frac{a_{\text{вх}i}^1}{2} + \frac{b_{\text{вх}i}^1}{2} \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \right) \cdot \sin \alpha_{\text{ш}} \right] +$$

$$+ p \cdot S_{\text{вєр}i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вєр}i}} \cdot \text{tg}(\rho - \gamma_{\text{вєр}i}) \cdot L_i -$$

$$-p \cdot S_{\text{вих } i}^1 \cdot e^{-a_{\text{вих } i}^1} \cdot [\text{tg}(\rho - \gamma_{\text{вих } i}) + \sin \alpha_{\text{ф}}] \times \\ \times \left[ \left( R_f + \frac{b_{\text{вих } i}^1}{2} \cdot \cos \alpha_{\text{ф}} \right) \cdot \cos \alpha_{\text{ф}} + \left( L_i - \frac{a_{\text{вих } i}^1}{2} - \frac{b_{\text{вих } i}^1}{2} \cdot \sin \alpha_{\text{ф}} \right) \cdot \sin \alpha_{\text{ф}} \right] \text{Н}\cdot\text{м}, \quad (8)$$

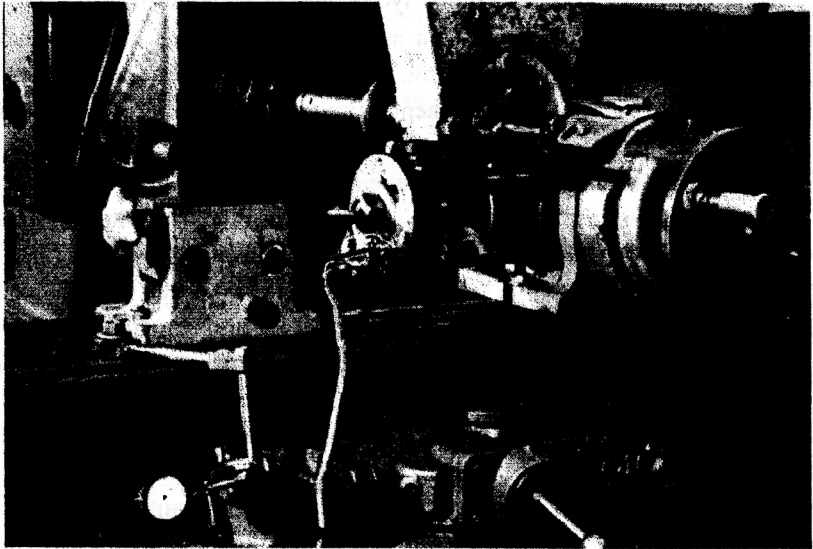
де  $L_i$  – віддаль від міжосьової лінії, яка проходить через вісь симетрії центральної впадини зубця заготовки, до осі даного зубця фрези у площині торця заготовки, мм (на вхідній ділянці приймають знак “+”, на вихідній – “-”);  $R_f$  – радіус впадин зубчастого колеса, мм;  $R_{\text{ф}}$  – зовнішній радіус фрези. Відповідними індексами позначені параметри зрізів, що припадають на вхідні (вх), вершинні (вер) та вихідні (вих) леза кожного  $i$ -го зубця шнекової фрези у мм<sup>2</sup>;  $p$  – питома сила різання, МПа. У формулі (5) приймаються значення, які мають параметри зрізів у передній площині шнекової фрези, а у формулах (6)-(8) – значення параметрів зрізів, приведені до площини торця зубчастого колеса. Знак “+” у формулі (8) відповідає напрямку колової подачі стола верстата.

Для перевірки теоретичних значень та закономірностей зміни параметрів зрізів, числових характеристик різання та формоутворення, викладених у роботах [1, 2, 4], а також для визначення складових сили різання та моментів і порівняння з їх значеннями за формулами (5)-(8) необхідно було розробити методіку проведення експериментальних досліджень, яка б узгоджувалася з методикою теоретичних пошуків і дозволила визначити особливості навантаження та роботу різання на кожному зубці і лезі шнекової фрези, її активну довжину, значення сил і крутних моментів у функції від миттєвих значень параметрів зрізів. Відомі з численних публікацій на цю тему методи дослідження зрізів та навантажень, розподілених між окремими зубцями і лезами, не повністю відповідають поставленій задачі. Так, при моделюванні даного процесу на токарному верстаті [5] характер робочих рухів неадекватний кінематиці шнекового зубофрезерування. Метод аналізу, описаний у роботі [6], потребує суттєвої зміни кінематики серійних зубофрезерних верстатів, а для вимірювання крутного моменту на фрезерній оправці при обробленні окремої впадини [7] необхідний спеціальний динамометр.

У розробленому методі експериментального дослідження зубонарізання робота шнекової фрези і кінематика зубофрезерного верстата моделюються робочими переміщеннями горизонтально-фрезерного верстата, оснащеного ділильною головкою. Схема експерименту наведена на рис.2, а суть його така. Заготовкою служить зубчасте колесо 1, частково оброблене шнековою фрезою на повну глибину профілю та на довжину, дещо більшу від довжини врізання шнекової фрези. Використання як заготовки попередньо нарізаного на зубофрезерному верстаті шнековою фрезою зубчастого колеса дозволяє утворити перехідну поверхню, на якій під час експерименту відбувається різання.

Заготовка з оправкою 2 кріпиться у патроні ділильної головки 3 і підтискається центром 4. Інструмент, що імітує роботу шнекової фрези – дисковий різець 5 з напаяним на нього зубцем шнекової фрези того ж модуля, яким нарізано зубці; різець встановлено на оправку фрезерного верстата. Рух обкочування моделюється повертанням заготовки за допомогою ділильної головки і переміщенням стола у поперечному напрямку

відносно нерухомого інструмента; у кожному відносному положенні різця і зубчастого колеса включається обертання шпинделя фрезерного верстата. Перед кожним наступним циклом стіл верстата переміщують у повздовжньому напрямку на величину, яка дорівнює подачі на зуб шнекової фрези.



**Рис.2.** Горизонтально-фрезерний верстат з оснащенням для проведення експериментальних досліджень різання та формоутворення.

Для забезпечення узгодженості вказаних рухів та переміщень заготовка попередньо виставляється відносно різця у поперечній площині так, що вісь симетрії впадини збігається з вертикальною віссю різця і відповідає міжосьовій лінії на зубофрезерному верстаті, при цьому інструмент повинен торкатися дна впадини, що відповідає умові рівності міжосьової віддалі у верстатному зачепленні шнекова фреза – зубчасте колесо. В осьовому напрямку заготовка відносно різця виставляється так, щоб при вільному прокручуванні оправки вершинне лезо різця збіглося зі слідом вершинного леза шнекової фрези на перехідній поверхні. Виконання цих умов забезпечує збігання поверхонь різання шнекової фрези та різця, який імітує її роботу; фіксування даного положення в осьовому напрямку здійснюється за допомогою індикатора 7. Кутівому повороту колеса на величину одиничного кута обкочування  $\psi$  повинно відповідати лінійне переміщення інструмента у тангенційному напрямку відносно заготовки на віддаль  $\Delta x$ , при цьому:

$$\psi = \frac{360^\circ}{z \cdot z_0} ; \quad (9)$$

$$\Delta x = \frac{\pi \cdot m}{z_0}, \quad (10)$$

де  $z$  і  $z_0$  – відповідно, кількість зубців колеса і кількість рейок шнекової фрези.

Для проведення експерименту необхідно повернути заготовку відносно умовної міжосьової лінії у вихідне положення, яке відповідає її повороту на кут  $k_{\max} \psi$  у напрямку, зворотному до напрямку обточування, та перемістити стіл із заготовкою у поперечному напрямку на віддаль, яка дорівнює  $\Delta x \cdot k_{\max}$ ; значення коефіцієнта  $k_{\max}$  визначається із співвідношення:

$$k_{\max} = \frac{L_0}{\Delta x} = \frac{R_a \cdot \sin(\arctg \frac{R_f}{R_a})}{\Delta x}, \quad (11)$$

де  $R_a$  і  $R_f$ , відповідно – радіуси виступів і впадин зубчастого колеса.

Щоб вивести заготовку та інструмент у вказане положення, треба вивести дану пару із верстатного зачеплення осьовим переміщенням стола, а після виконання зазначених вище рухів знову повернути стіл в осьовому напрямку у попередню позицію, виставивши його за індикатором 7. За допомогою цього ж індикатора виставляється умовна осьова подача та подача на зуб шнекової фрези.

Імітація роботи шнекової фрези полягає в тому, що стіл із заготовкою переміщують періодично з вихідної точки у поперечному напрямку на величину  $\Delta x$ . Даний рух відносно нерухомої в поперечному напрямку оправки з різцем імітує лінійне переміщення гвинтової поверхні шнекової фрези при її обертанні навколо своєї осі. З такою ж періодичністю повертають за допомогою ділильної головки заготовку на одиничний кут поділу. До циклу взаємних переміщень заготовки та різця додається періодичне переміщення стола верстата у повздовжньому напрямку на величину, яка чисельно дорівнює подачі на зуб шнекової фрези. Усі вказані переміщення стола здійснюють вручну, а величини переміщень визначають по лімбу. Кожного разу після виконання вказаних дій у кожному відносному положенні заготовки та різця включають обертання шпинделя верстата.

При певному  $k_i$ -му елементарному рухові буде зафіксовано перший різ, який відповідає активній довжині шнекової фрези  $L_{\text{авх}}$  на вхідній ділянці:

$$L_{\text{авх}} = \frac{(k_{\max} - k_i) \cdot \Delta x}{\cos \lambda}; \quad (12)$$

а останній  $k_j$ -й різ на виході, який супроводиться утворенням стружки, визначить активну частину фрези на вихідній ділянці:

$$L_{\text{авих}} = \frac{k_j \cdot \Delta x}{\cos \lambda}, \quad (13)$$

де  $\lambda$  – кут підйому гвинтової лінії фрези.

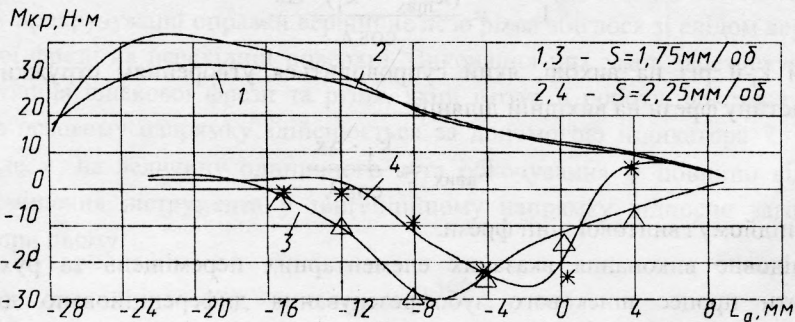
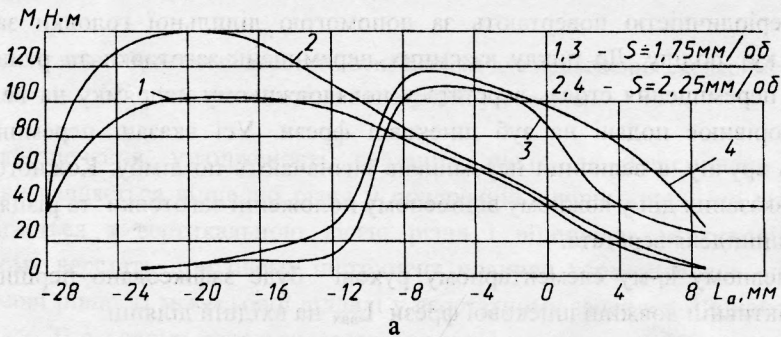
Послідовне виконання вказаних елементарних переміщень та рухів дозволяє відстежувати процес шнекового зубофрезерування диференційовано для кожного окремого зубця та леза. Збір та аналіз стружок, зрізаних у кожному відносному положенні заготовки та різця, що відповідає різі шнекової фрези у реальному процесі,

дозволяє визначити об'ємні та вагові характеристики стружки, довжини дуг різання і коефіцієнти осадження, виявити леза, які різуть у кожному кутовому положенні, а також знайти навантаження та розподіл роботи стружкоутворення між окремими зубцями і лезами.

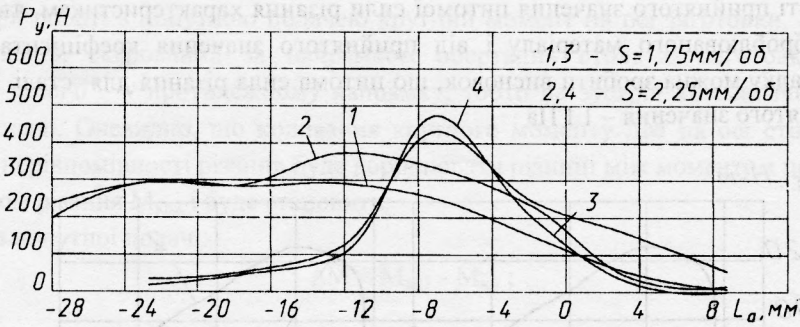
Зміною напрямку переміщення стола верстата на протилежний відносно напрямку обертання різця відтворюється нарізання зубчастого колеса з попутною або зустрічною подачею, а використання інших впадин на заготовці зубчастого колеса дає можливість багатократно використовувати дану заготовку для проведення експериментів з іншими значеннями режимів різання та параметрами шнекової фрези в межах одного модуля.

Під час виконання експерименту на першому етапі знаходилися та порівнювалися з отриманими на основі моделі параметрів зрізів активна довжина фрези на вхідній та вихідній ділянках, довжини дуг різання на кожному зубці, робота окремих лез та форма стружки у кожному взаємному положенні інструмента і заготовки.

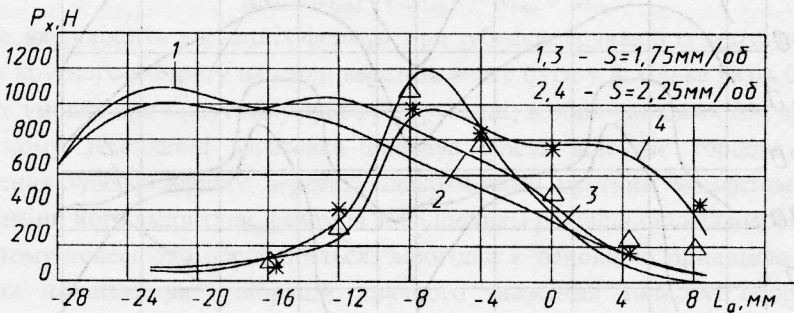
На другому етапі вимірювалися значення сили подачі і крутного моменту на заготовці. Для цього на ступиці зубчастого колеса вифрезеровані вікна, а на бокових площинах спиць та внутрішніх поверхнях зубчастого обода наклеєні тензометричні давачі, з'єднані двома мостовими схемами і змонтовані на кронштейні 8 (рис.2). Сигнали з тензодавачів фіксувалися за допомогою записуючого електронного осцилографа мод. ІС-78. Тарування давачів здійснювалося за допомогою вантажів масою 2, 5 і 10 кг і важелів із передатним співвідношенням 2,5:1 в осьовому напрямку та 1,25 : 1 в тангенційному напрямку.







в



г

**Рис.3.** Закономірності зміни сил та моментів при обробленні однієї впадини:

а – крутний момент на осі фрези;

б – крутний момент на осі заготовки;

в – радіальна складова сили різання, прикладена до заготовки;

г – осьова складова сили різання, прикладена до заготовки.

1, 2 – подача попутна 3, 4 – подача зустрічна.

Моделювалося оброблення зубчастого колеса зі сталі 35 з модулем 5 мм і кількістю зубців 22 шнековою фрезою із зовнішнім діаметром 110 мм, кількістю рейок 9, кутом підйому гвинтової лінії –  $1,2^\circ$ , кутом профілю вихідного контуру –  $\alpha_{\text{в}} = 1,2^\circ$  при зустрічному та попутному фрезеруванні з осьовою подачею 1,75 мм/об та 2,25 мм/об; оброблення велося без використання МОР. Для розрахунків силових факторів прийнято значення питомої сили різання 1 ГПа; кут тертя –  $\rho = 0,75$ .

У результаті експерименту встановлено, що всі теоретичні параметри різання, які перевірялися, повністю збіглися із фактичними значеннями. Результати проведення другого етапу експерименту відмічені на рис.3,б,г точками; дещо вищі від фактичних розрахункові значення сил та моментів пояснюються тим, що до розрахунків приймалися, згідно з методикою [1, 2], максимальні значення товщини та ширини зрізів. Для порівняння експериментальних та теоретичних значень, отриманих на основі залежностей (5)-(8), на рис.3 побудовані теоретичні графіки зміни сил та моментів, а на рис.4 наведені графіки зміни сумарного крутного моменту на фрезі за період її одного оберту. Як видно з вказаних рисунків, експериментальні значення добре узгоджуються з теоретичними. Кінцева точність розрахунків у кожному випадку залежить від

відповідності прийнятого значення питомої сили різання характеристикам твердості та міцності оброблюваного матеріалу і від прийнятого значення коефіцієнта тертя. У даному випадку можна зробити висновок, що питома сила різання для сталі 35 близька до прийнятого значення – 1 ГПа

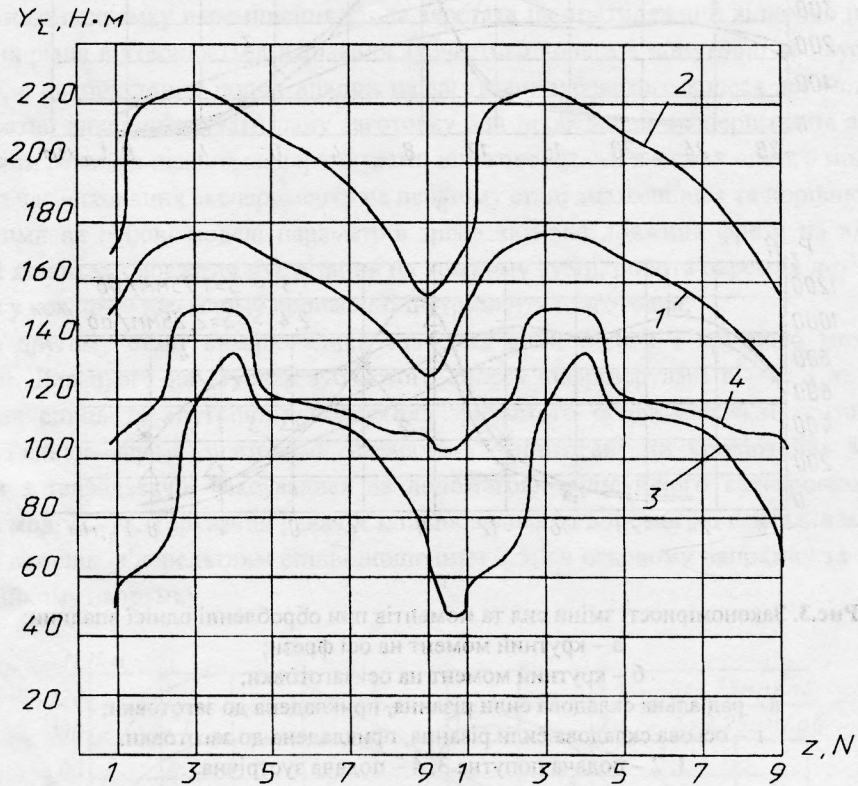


Рис.4. Закономірності сумарних моментів на рейках за період одного оберту шнекової фрези.

Перевірка отриманих у цій роботі залежностей, покладених в основу розрахунків силового поля шнекової фрези, проводилася також непрямым шляхом, для аналогічних з експериментами [6, 7, 8] умов, і теж показала задовільне сходження теоретичних та експериментальних даних.

З аналізу отриманих результатів можна зробити такі висновки.

1. Крутний момент (рис.3,б) і осьова сила (рис.3,г), прикладені до зубчастого колеса, при попутній подачі дещо більші, ніж при тих самих значеннях “s” при зустрічній подачі, а радіальна сила, що діє на зубчасте колесо, (рис.3,в) при обох порівнюваних значеннях “s” є меншою при попутному зубофрезеруванні.

2. Сумарний крутний момент на рейках фрези (рис.4) при обох значеннях подачі є більшим при попутному напрямку “s”, але найбільша нерівномірність різання за крутним моментом припадає на зубофрезерування із зустрічною подачею зі значенням 1,75 мм/об і становить 1,49.

3. При роботі з попутною подачею крутний момент на осі заготовки, викликаний силою різання, скерований за напрямком обертання стола із заготовкою, а при зустрічній подачі – у протилежному напрямку, тобто на зустріч кінематичному рухові колової подачі. Очевидно, що коливання крутного моменту  $\Delta M$  на осі стола верстата внаслідок нерівномірності різання буде дорівнювати різниці між моментом приводу  $M_{кр1}$  та моментом різання  $M_{кр2}$  і буде становити:

– для попутної подачі:

$$\Delta M = M_{кр1} - M_{кр2};$$

– для зустрічної подачі:

$$\Delta M = M_{кр1} - (-M_{кр2}) = M_{кр1} + M_{кр2}.$$

Отже, як виходить з останніх формул, при зубофрезеруванні із зустрічною подачею коливання крутного моменту на столі верстата може бути у декілька разів більшим, ніж при тих же умовах при попутному зубофрезеруванні; в обох випадках  $\Delta M$  зростає, якщо у верстатному зачепленні заготовка–шнекова фреза відсутнє торцеве перекриття. Навантаження зубофрезерного верстата знакозмінним крутним моментом при такому діапазоні зміни його амплітуди, разом із збільшенням радіальної складової сили різання на зубчастому колесі, що оброблюється, вірогідно є основною причиною підвищених динамічних навантажень і вібрацій, значного зниження точності оброблення, яке спостерігають при нарізанні зубчастих коліс із зустрічною подачею, та однією з причин зменшення стійкості шнекових фрез під час зустрічного зубофрезерування.

1. Грицай І.Є. Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами // *Машинознавство*. 1998. N 7. С.23-27. 2. Грицай І.Є. Технологічне моделювання у графічній системі "Компас-графік" // "Комп'ютерне проектування в навчальному процесі": Тез. наук.-метод. конф. Львів, 1998. 3. Клушин М.И. Резание металлов. М., 1958. 4. Грицай І.Є. Аналіз параметрів зрізів та розподілу навантаження під час роботи черв'ячної фрези з попутною та зустрічною подачею // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 1999. N 359. С.20-24. 5. Медведев С.Н. Высокопроизводительное зубофрезерование фрезами. М., 1981. 6. Сахаров Н., Кубрак В.В. Силовые зависимости при фрезеровании методом обкатки // *Станки и инструмент*. 1972. N 7. С.65-68. 7. Митряев К.Ф. Новые исследования в области динамики и тепловых явлений при зубофрезеровании. В кн.: *Прогрессивные методы производства зубатых колес и их технологичность* / Под ред. М.Б.Громана. М., 1962. 8. Исследование сил и мощности резания при высокопроизводительном зубофрезеровании: (Отчет о НИР). М., 1954. 101 с.