

**Б. Гевко, докт. техн. наук; А. Дячун**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ РОЗТОЧУВАННЯ ГВИНТОВИХ ГОФРОВАНИХ ЗАГОТОВОК (ГГЗ)**

*Проведено аналіз динамічних навантажень на систему верстат-пристрій-деталь при розточуванні внутрішнього отвору гвинтових гофрованих заготовок. Запропоновано динамічну систему даного процесу, на основі якої складено систему диференціальних рівнянь руху, що розв'язана чисельним методом. Досліджено величину деформації матеріалу гвинтової гофрованої заготовки в залежності від швидкості різання та жорсткості деформованої частини. Представлено конструкцію пристрою для розточування внутрішніх отворів ГГЗ.*

**B. Gevko, A. Dyachun**

## **DYNAMICS OF PROCESS OF BORING OF THE SPIRAL CORRUGATED BLANKS**

*The analysis of the dynamic loadings on the system machine-tool device detail during boring of internal diameter of the spiral corrugated blanks is conducted. The dynamic system of this process is suggested, on the base of which the system of differential equations is made, that was solved by the numerical method. The value of deformation of material of the spiral corrugated blank is explored, depending on speed of cutting and inflexibility of the deformed part. The fixture for boring of internal opening is presented.*

### **Умовні позначення**

- $I_1$  - зведений момент інерції ротора двигуна;
- $I_2$  - зведений момент інерції коробки швидкостей до вала двигуна;
- $I_3$  - зведений момент інерції пристрою до шпинделя;
- $I_4$  - зведений момент інерції ГГЗ і затискного елемента;
- $m_1$  - маса деформованої частини ГГЗ;
- $k_1$  - коефіцієнт жорсткості деформованої частини ГГЗ;
- $C_{12}$  - зведена жорсткість коробки швидкостей до вала між двигуном і коробкою швидкостей;
- $C_{23}$  - зведена жорсткість пристрою до шпинделя;
- $C_{34}$  - зведена жорсткість ГГЗ і затискного елемента;
- $M_1$  - крутний момент на роторі електродвигуна;
- $P_1$  - сила удару;
- $P_z$  - сила різання;
- $F_1$  - сила опору переміщенню;
- $\gamma_3$  - відносний кут різання;
- $\gamma_1$  - кут підйому середньої лінії внутрішнього радіуса ГГЗ;
- $\gamma_2$  - кут підйому гвинтової лінії подачі різця;
- $T$  - крок ГГЗ;
- $r$  - радіус розточування;
- $S$  - подача різця;
- $l$  - довжина лінії контакту інструменту з полотном ГГЗ;
- $H$  - товщина матеріалу ГГЗ;
- $\delta$  - прогин поверхні ГГЗ по нормалі до точки контакту;
- $\alpha$  - кут при вершині гофр;
- $v$  - швидкість різання;

$\tau_K$  - час контакту різця із ГГЗ;  
 $n$  – кількість обертів шпинделя за секунду;  
 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  - узагальнені координати, кути повороту інерційних мас;  
 $x_5$  - узагальнена координата переміщення деформованої частини ГГЗ;  
 $\hat{O}_2$  - функція розсіювання;  
 $\beta_1, \beta_2$  - коефіцієнти демпфірування;  
 $C_{PZ}, x, y, n, K_z$  – коефіцієнти при силі різання;  
 $k_2$  - коефіцієнт, що визначає кут нахилу лінії зміни сили  $P_z$ ;  
 $k_3$  - коефіцієнт, що враховує геометрію різця, та ступінь його зношення;  
 $S_1$  - імпульс сили удару;  
 $\tau_0$  - початковий момент часу;  
 $\tau_{K2}$  - тривалість удару;  
 $V_K$  - кінцева відносна швидкість руху деформованої частини ГГЗ;  
 $V_f$  - початкова відносна швидкість руху деформованої частини ГГЗ;  
 $K_A$  - коефіцієнт відновлення;  
 $b$  – коефіцієнт на порядок вищий за величину сили удару;  
 $\psi_i$  - відносні координати.

**Постановка проблеми.** Сучасні технічні системи, до складу яких входять ГГЗ, а також виробництво, висувають підвищені вимоги до їх якості і точності. При виготовленні ГГЗ методами деформування стрічкових або листових заготовок не завжди забезпечується необхідна точність їх зовнішніх і внутрішніх діаметрів. Відхилення від необхідних розмірів досягає до 3мм., а овальність і ексцентриситет до 2мм. Для прогресивних машин і конструкцій ці відхилення є неприпустимими. Крім цього, при серійному виробництві аналіз розмірних ланцюгів показав, що граничні допуски на відхилення від розмірів і форми мають бути не більше 0,5 – 1мм для забезпечення стабільного процесу складання необхідних вузлів машин і механізмів, до складу яких входять ГГЗ. Тому актуальним є введення операцій розточування в технологічний процес виготовлення ГГЗ, а в деяких випадках - і процесу шліфування.

Особливості геометрії ГГЗ мають значний вплив на динаміку процесу проточування, а також на будову необхідних пристроїв та інструментів. Проточування зовнішніх і внутрішніх діаметрів ГГЗ можна проводити прохідними різцями, як і для звичайних циліндричних поверхонь. Проте цей процес має суттєві відмінності. По-перше, ГГЗ характеризуються порівняно низькою жорсткістю, по-друге, вони належать до перервних поверхонь. Тому процес їх точіння пов'язаний із надзвичайно складними ударними та формотворними процесами. Внаслідок цього виникає необхідність у побудові математичної моделі, яка б показувала характер зміни навантажень на систему ВПД. Загальну оцінку динамічного характеру проявлення навантаження можна одержати на основі введення коефіцієнта динамічності як відношення величини деформації системи при динамічній і статичній дії.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідженню навантажень на несучу систему верстата і різця як інструмент обробки присвячено декілька праць [1], [2], [3], в яких представлено диференціальні рівняння руху вказаних елементів, що розв'язані чисельним методом. Наведено графіки коливань узагальнених координат різця, станини і супорта верстата, тоді як характер навантажень на деталь (ГГЗ), пристрій і привід обертів шпинделя верстата та величина деформації полотна ГГЗ потребують окремого дослідження.

**Постановка задачі.** Метою даного дослідження є визначення динамічних навантажень на систему деталь (ГГЗ), пристрій, привід обертів шпинделя верстата, а також вплив швидкості різання і жорсткості ГГЗ на величину деформації полотна ГГЗ.

**Виклад основного матеріалу.** Розточування перервних поверхонь ГГЗ належить до перехідних динамічних процесів. Вирішення задачі з виявлення дійсних навантажень на ГГЗ, пристрій і силовий привід верстата під час перехідного процесу з врахуванням коливань є однією із важливих проблем теорії розрахунку вказаних елементів. Дослідження деталей динамічної системи шляхом виділення їх із ланцюга не може дати достатньо точного уявлення про дійсні напруження в складових частинах системи ВПД. Тому розрахунок системи взаємозв'язаних деталей потрібно проводити з врахуванням пружності їх зв'язків, а значить, і коливального руху всіх її елементів.

Розглянемо детально пристрій із закріпленою в ньому ГГЗ, в якій проводиться розточування внутрішнього діаметра ГГЗ (рис.1). Пристрій закріплено на шпинделі токарно-гвинторізного верстата.

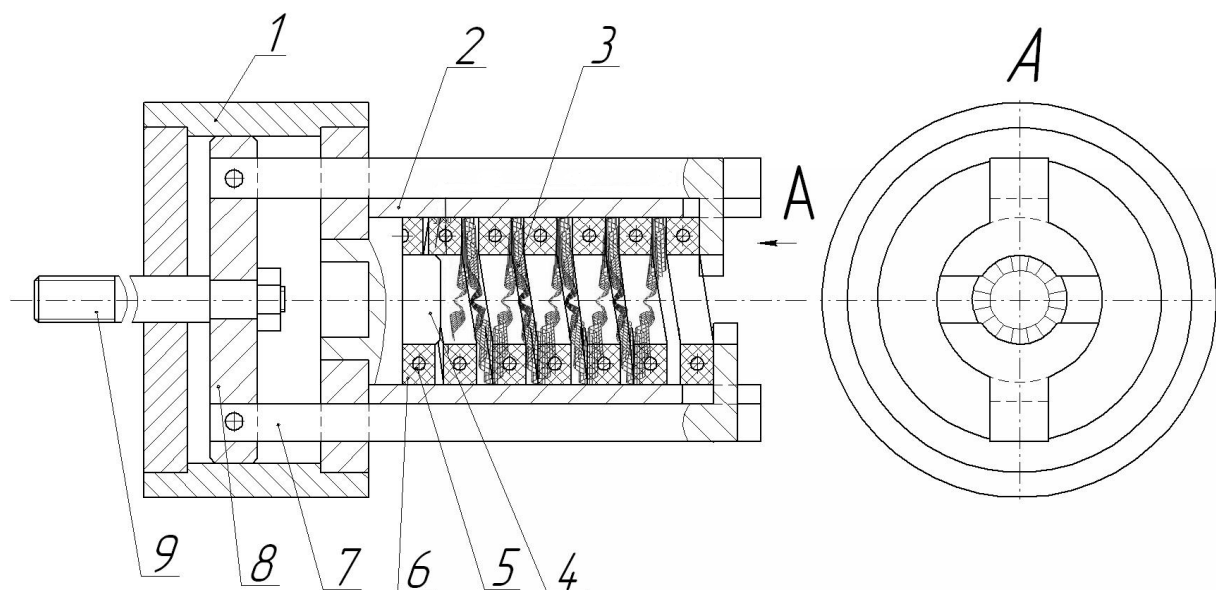


Рисунок 1 - Пристрій для розточування внутрішнього діаметра ГГЗ

Пристрій для розточування внутрішнього діаметра ГГЗ (рис.1) складається із пустотілого циліндричного корпусу 1, на якому встановлено циліндричну базову втулку 2, діаметр внутрішнього отвору якої дорівнює зовнішньому діаметру ГГЗ 3. Всередині базової втулки 2 на опорі 4 жорстко встановлено гвинтовий затискний елемент 5 у вигляді пружини із гумовою накладкою 6. При цьому величина проміжків між витками гвинтового затискного елемента 5 більша на 1...2 міліметри від висоти гофр ГГЗ. На зовнішній поверхні базової втулки 2 виконані пази прямокутного поперечного перерізу, в яких встановлено захоплювачі 7, що при затиску є у взаємодії із торцевою поверхнею гвинтового затискного елемента 5. Захоплювачі 7 приєднані до циліндра 8 і мають можливість пересуватись разом з ним вздовж осі пристрою за рахунок тяги 9, що загвинчується у пневмо- (гідро-) привід верстата. Пристрій встановлюється в кулачках патрона або закріплюється на планшайбі шпинделя токарного верстата. Перед початком роботи циліндр 8 із захоплювачами 7 за допомогою тяги 9 пересувається у праве крайнє положення, ГГЗ загвинчують у базову втулку 2 між витки гвинтового затискного елемента 5. Після цього здійснюється затиск ГГЗ захоплювачами 7, які за допомогою циліндра 8 і тяги 9 від пневмоприводу верстата пересуваються у крайнє ліве положення. Вмикають оберти шпинделя верстата і виконують операцію розточування внутрішнього отвору ГГЗ.

Значення моментів сил пружності для системи, показаної на рис.1, можуть бути знайдені за допомогою розв'язання диференціальних рівнянь руху – рівнянь динаміки,

що описують перехідні процеси в даній системі ВПД. Якщо розглядати реальний процес проточування із всіма складовими, прийшлося би створювати складну систему диференціальних рівнянь, яку б не тільки було важко вирішити, але й проаналізувати. Тому, щоб визначити основний характер проточування ГГЗ, відкидаємо другорядні фактори і приходимо до деякої ідеалізації системи.

Систему ВПД представимо механічною моделлю, що складається із зосереджених махових мас, з'єднаних пружними зв'язками. Пружні зв'язки допустимо невагомими, що характеризуються постійним коефіцієнтом жорсткості. Місцевими напруженнями і деформаціями в місцях з'єднання окремих елементів системи будемо нехтувати. Із всіх можливих дійсних перехідних процесів і характеристик зміни прикладених сил виберемо такі, щоб одержати максимально можливі в перехідному процесі значення моментів сил пружності в окремих елементах системи.

Згідно з вищевказаним, систему із приводу обертання, пристрою і деталі можна звести до еквівалентної багатомасової системи на рис.2.

При проточуванні ГГЗ проходить деформація листового матеріалу ГГЗ в місці дотику із різцем, що негативно впливає на якість обробленої поверхні.

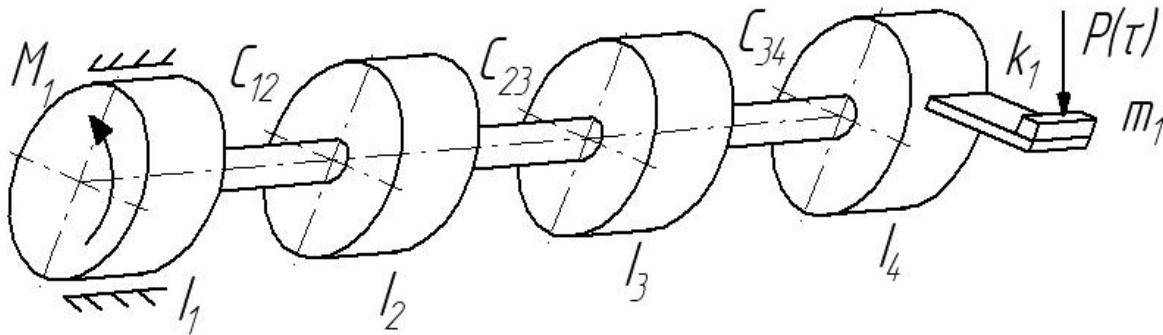


Рисунок 2 – Схема динамічної моделі процесу розточування ГГЗ

Розточування ГГЗ можна розглядати як перетин двох поверхонь: внутрішнього діаметра ГГЗ і гвинтової поверхні обробки від подачі різця. Траєкторія розточування ГГЗ показана на рис. 3. Якщо розвернути внутрішню поверхню ГГЗ і гвинтову поверхню обробки на систему координат  $xoy$ , розміщену на площині, дотичній до середньої лінії внутрішнього діаметра ГГЗ з початком в точці дотику, то одержимо рисунок 4.

Відносний кут різання  $\gamma_3$  визначаємо за формулою:

$$\gamma_3 = \gamma_1 - \gamma_2 \quad (1)$$

При цьому кути  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  визначаємо із виразів:

$$\gamma_1 = \arctg \frac{T}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \arctg \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3)$$

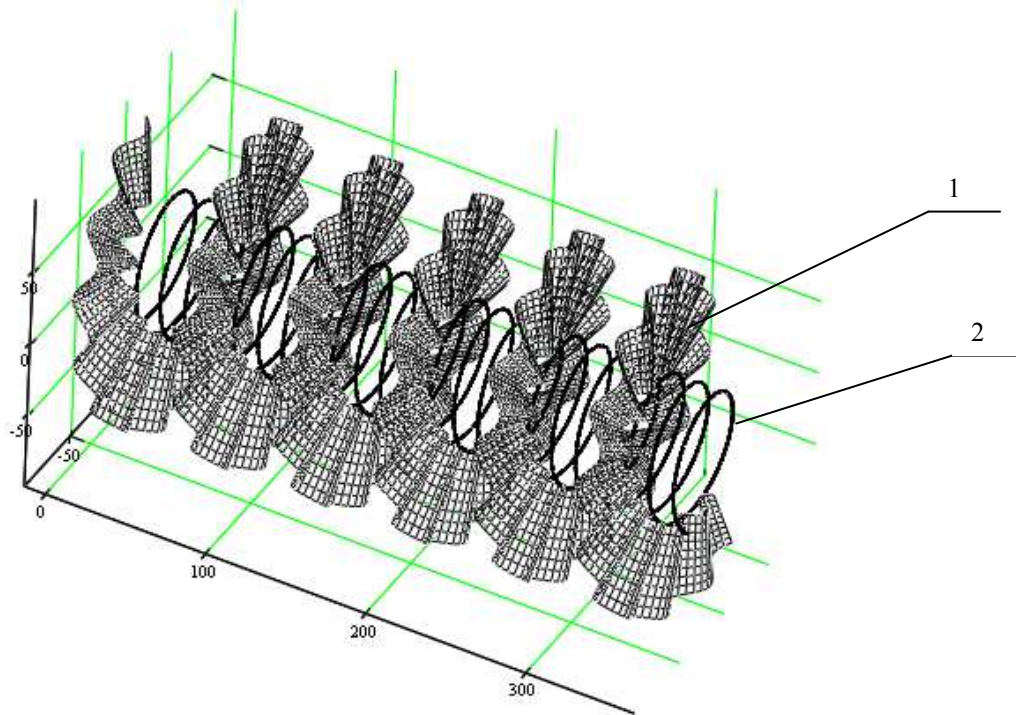


Рисунок 3 – Візуальна модель процесу розточування ГГЗ  
1 - гвинтова гофрована заготовка; 2 - траєкторія обробки прохідним різцем

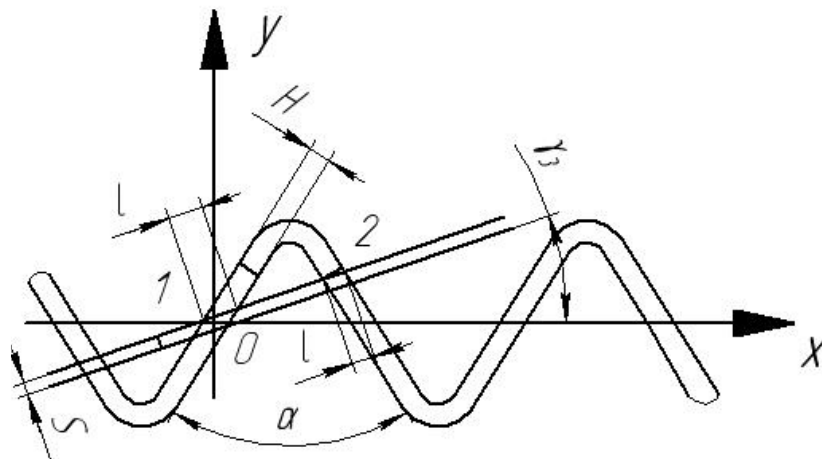


Рисунок 4 – Схема розточування внутрішнього діаметра ГГЗ прохідним різцем

Кількість точок удару ГГЗ із різцем за один оберт можна визначити графічним способом, як це показано на рисунку 4. В нашому випадку буде 3 удари за один оберт шпинделя. Закон зміни навантажень на ГГЗ можна подати як функцію від часу  $\tau$  чи від величини взаємного переміщення вершини різця та ГГЗ по довжині  $l$  лінії контакту інструменту з полотном ГГЗ у нерухомих координатах. Довжина лінії контакту має два значення, як це показано на рисунку 4 (випадки 1 і 2). У випадку 1 проходить поступове врізання різця в гофру ГГЗ, тому і деформація самого полотна ГГЗ є меншою, ніж у випадку 2, де проходить різке врізання.

Довжину лінії контакту, згідно з рисунком 4, визначаємо з залежності:

$$l = \frac{H + \delta}{\cos\left(\frac{\alpha}{2} \pm \gamma_3\right)}. \quad (4)$$

У формулі (4) знак + відноситься до випадку поступового врізання, а знак – до різкого врізання.

Оскільки жорсткість різця значно вища жорсткості ГГЗ, впливом деформації інструменту при оцінюванні довжини лінії контакту нехтуємо. За час контакту різця із ГГЗ можна виділити наступні етапи:

1. Зближення на швидкості  $v$ , внаслідок чого проходить удар.
2. Зсув металу із утворенням стружки (власне процес різання) із змінним в часі об'ємом деформованого металу і відповідно змінними глибиною різання  $t_p$  і подачею  $S$ .
3. Різання металу із постійними значеннями глибини різання  $t_p$  і подачі  $S$ .
4. Вихід ГГЗ із зони різання із змінними значеннями глибини різання  $t_p$  і подачі  $S$  з наступним затухаючим коливанням.

Час контакту різця із ГГЗ буде дорівнювати:

$$\tau_k = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n} \quad (5)$$

Розглядувана система на рисунку 2 має п'ять степенів вільності. Вибираємо за узагальнені координати кути повороту інерційних мас  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  та переміщення маси  $m_1$ , що рівне  $x_5$ . Кінетична енергія системи:

$$T = \frac{I_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{I_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2}{2} + \frac{I_3 \cdot \dot{\varphi}_3^2}{2} + \frac{I_4 \cdot \dot{\varphi}_4^2}{2} + \frac{m_1 \cdot \dot{x}_5^2}{2} \quad (6)$$

Потенціальна енергія системи:

$$\Pi = \frac{C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} + \frac{C_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4)^2}{2} + \frac{k_1 \cdot (x_5 - r \cdot \varphi_4)^2}{2} \quad (7)$$

Складемо диференціальні рівняння руху системи для вимушених коливань, застосовуючи рівняння Лагранжа другого роду. Для мас, що здійснюють крутильні коливання:

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} = M_i \quad (8)$$

Для мас, що здійснюють лінійні переміщення:

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_5} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_5} = P_1 + P_z + F_1 + \Phi_2 \quad (9)$$

Виконуючи відповідні перетворення рівнянь (8), (9), враховуючи функцію розсіювання  $\Phi_1$  для переміщення маси  $I_4$ , одержимо систему рівнянь вимушених коливань:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) &= -M_1; \\ I_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 - C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) &= 0; \\ I_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 - C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) + C_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) &= 0; \\ I_4 \cdot \ddot{\varphi}_4 - C_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) - k_1 \cdot r \cdot (x_5 - r \cdot \varphi_4) + \beta_1 \cdot \dot{\varphi}_4 &= 0; \\ m_1 \cdot \ddot{x}_5 + k_1 \cdot (x_5 - r \cdot \varphi_4) &= P_1 + P_z + F_1 - \beta_2 \cdot \dot{x}_5. \end{aligned} \quad (10)$$

У системі рівнянь (10) не брались до уваги функції розсіювання для координат  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , оскільки коефіцієнти жорсткості  $C_{12}$  і  $C_{23}$  на два порядки вищі за коефіцієнти жорсткості  $C_{34}$  і  $k_1$ .

Враховуючи те, що на початку і в кінці зони різання проходить зміна величини глибини різання  $t_p$  і подачі  $S$ , на цих ділянках силу різання  $P_z$  представимо відповідно зростаючою і спадаючою лінійними залежностями. На ділянці, де глибина різання і подача є постійними величинами, силу різання  $P_z$  з достатньою точністю приймаємо також постійною, що визначається емпіричною залежністю:

$$P_{zC} = 10 \cdot C_{PZ} \cdot t_p^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_z \quad (11)$$

Коефіцієнти  $C_{pz}$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $n$ ,  $K_z$  визначаються експериментально і залежать від властивостей оброблюваних матеріалів і різальних матеріалів, а також від геометрії різального інструменту.

Тоді використовуємо допоміжну безрозмірну алгебраїчну функцію:

$$F_8 = \left( \frac{\tau_K}{2} - \left| \frac{\tau_K}{2} - \tau \right| \right) \cdot k_2. \quad (12)$$

Використовуючи рівняння (12), силу різання  $P_z$  представимо залежністю:

$$P_z = \frac{F_8 + P_{zC} - |F_8 - P_{zC}| + |F_8 + P_{zC} - |F_8 - P_{zC}||}{4}. \quad (13)$$

Зміну сили різання  $P_z$  від часу  $\tau$  представлено на рисунку 5.

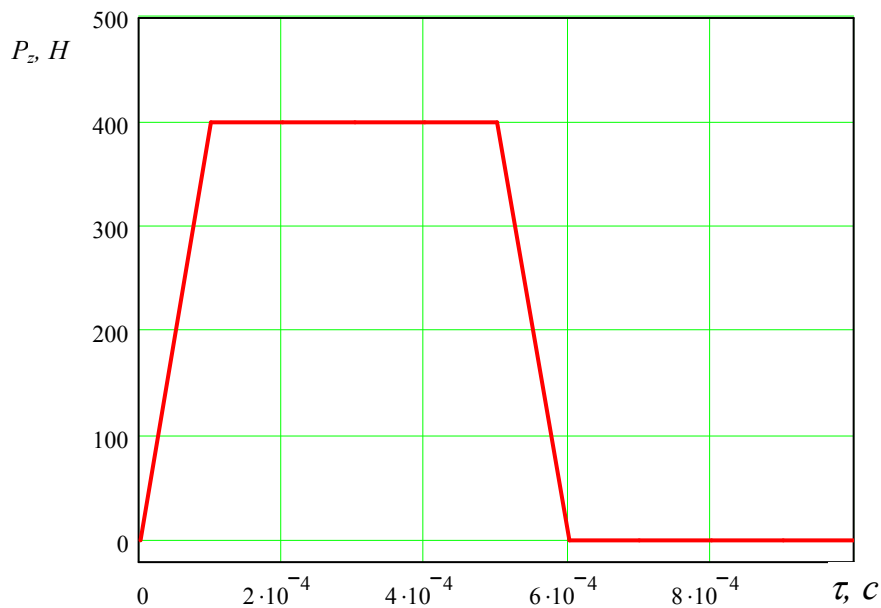


Рисунок 5 - Графік залежності сили різання  $P_z$  від часу

Величину сили опору переміщенню  $F_l$  від зношення інструменту по задній поверхні приймаємо пропорційною силі різання  $P_z$ :

$$F_l = k_3 \cdot P_z. \quad (14)$$

Досліджуючи ударну взаємодію частини ГГЗ із різцем, враховуємо лише дію миттєвої сили удару  $P$ , яка є великою, але такою, що створює імпульс із скінченною величиною:

$$\vec{S}_1 = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_{K2}} \vec{P}_1 d\tau. \quad (15)$$

Під час зіткнення твердих тіл  $\tau_{K2}$  має порядок  $10^{-4}$  с. Як відомо із теоретичної механіки:

$$\vec{S}_1 = m_1 \cdot \vec{V}_K - m_1 \cdot \vec{V}_{II}. \quad (16)$$

Для нашого випадку  $\tau_0=0$ ,  $V_{II}=0$ , кінцева відносна швидкість руху деформованої частини ГГЗ  $V_K$  рівна швидкості різання  $v$ . Оскільки удар не є абсолютно пружним, вводимо коефіцієнт відновлення  $K_B$ , що враховує фізико-механічні властивості матеріалів і лежить на проміжку  $0 < K_B < 1$ . Прийmemo силу удару  $P$  постійною на проміжку від  $\tau_0$  до  $\tau_{K2}$ . Тому, прирівнюючи рівняння (15) і (16), враховуючи коефіцієнт відновлення, після відповідних перетворень одержимо:

$$P_1 = K_B \cdot \frac{m_1 \cdot V_K}{\tau_{K2}}. \quad (17)$$

Для того, щоб ввести силу удару  $P$  у динамічну модель, враховуючи її короткочасну дію, вводимо допоміжний безрозмірний коефіцієнт:

$$F_9 = b \cdot \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_{K2}} \right). \quad (18)$$

Тоді, аналогічно до сили різання  $P_z$ , силу удару представимо алгебраїчною функцією:

$$P_1 = \frac{F_9 + P - |F_9 - P| + |F_9 + P - |F_9 - P||}{4}. \quad (19)$$

Зміну сили удару у часі  $\tau$  представимо на рисунку 6.

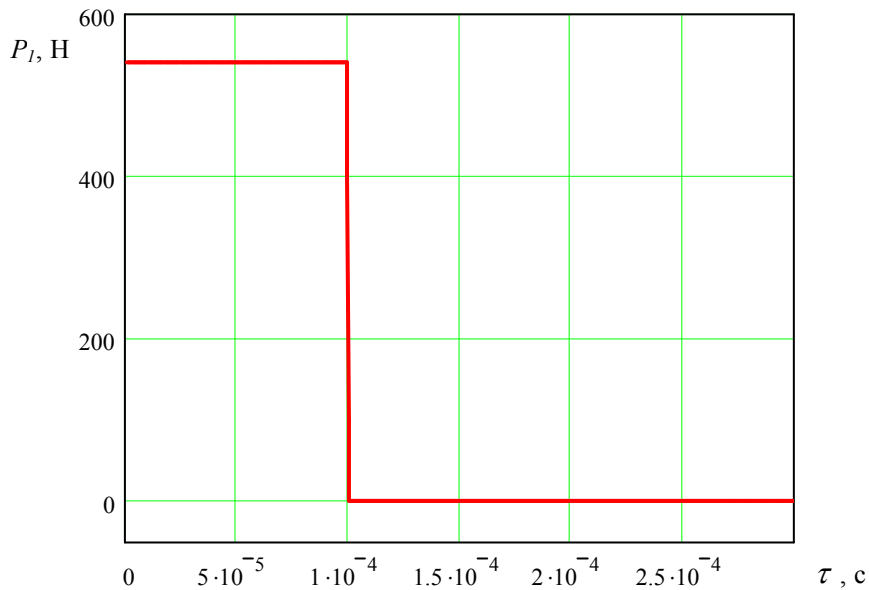


Рисунок 6 - Графік зміни сили удару  $P_1$  у часі  $\tau$

Оскільки на якість обробки ГГЗ має вплив відносна деформація пружних елементів динамічної системи, перетворимо систему рівнянь (10) так, щоб перейти до відносних координат  $\psi_i$ , при цьому приймемо:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \varphi_1 - \varphi_2; \\ \psi_2 &= \varphi_2 - \varphi_3; \\ \psi_3 &= \varphi_3 - \varphi_4; \\ \psi_4 &= x_5 - r \cdot \varphi_4. \end{aligned} \quad (20)$$

При розрахунку перехідних процесів, що викликані миттєвим прикладанням зовнішніх навантажень, не прийнято враховувати вплив затухання коливальних процесів, оскільки оцінювання перехідного процесу ведеться за коефіцієнтом динамічності, що представляє відношення найбільшого миттєвого значення моменту сил пружності до статичного навантаження. Найбільша величина миттєвого моменту пружності у пружних елементах системи, як правило, досягається в перший півперіод коливань, коли ефект затухання практично мало впливає на формування моментів пружності. Тому систему рівнянь (10) з врахуванням (20) після відповідних перетворень запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_1 &= \frac{-M_1 - C_{12} \cdot \psi_1}{I_1} - \frac{C_{12} \cdot \psi_1 - C_{23} \cdot \psi_2}{I_2}; \\ \ddot{\psi}_2 &= \frac{C_{12} \cdot \psi_1 - C_{23} \cdot \psi_2}{I_2} - \frac{C_{23} \cdot \psi_2 - C_{34} \cdot \psi_3}{I_3}; \end{aligned} \quad (21)$$



$$\ddot{\psi}_3 = \frac{C_{23} \cdot \psi_2 - C_{34} \cdot \psi_3}{I_3} - \frac{C_{34} \cdot \psi_3 + r \cdot k_1 \cdot \psi_4}{I_4};$$

$$\ddot{\psi}_4 = \frac{-k_1 \cdot \psi_4 + (P_1 + P_z + F_1)}{m_1} - \frac{C_{34} \cdot \psi_3 \cdot r + r^2 \cdot k_1 \cdot \psi_4}{I_4}.$$

Початкові умови для системи рівнянь записуємо з наступних міркувань. При розточуванні ГТЗ до моменту зіткнення різця з гофрою, від якого і ведемо відлік часу, не відбувається відносної деформації пружних елементів системи. Тому початкові відносні координати і швидкості приймаємо рівними нулю. Подальша деформація відбувається за рахунок дії зовнішніх сил. Отже, для  $\tau=0$  маємо:

$$\begin{aligned} \psi_1(0) = 0, \psi_2(0) = 0, \psi_3(0) = 0, \psi_4(0) = 0; \\ \dot{\psi}_1(0) = 0, \dot{\psi}_2(0) = 0, \dot{\psi}_3(0) = 0, \dot{\psi}_4(0) = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь (21) з початковими умовами (22) доцільно провести на комп'ютері із застосуванням стандартної підпрограми чисельного методу Рунге-Кутта.

Чисельні значення параметрів математичної моделі для умов розточування ГТЗ наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 1 - Чисельні значення параметрів математичної моделі

$C_{12}$	$40 \cdot 10^6$ Н·мм/рад	$I_4$	$4000$ кг·мм <sup>2</sup>
$C_{23}$	$40 \cdot 10^6$ Н·мм/рад	$m_1$	$0,009$ кг
$C_{34}$	$1 \cdot 10^6$ Н·мм/рад	$r$	$50$ мм
$k_1$	$500$ Н/мм	$P_z$	$400$ Н
$I_1$	$16000$ кг·мм <sup>2</sup>	$I_4$	$150000$ кг·мм <sup>2</sup>
$I_3$	$32000$ кг·мм <sup>2</sup>	$\nu$	$3$ м/с

Оскільки найбільший вплив на якість оброблюваної поверхні має відносна деформація  $\psi_4$ , тому розрахунок системи рівнянь (21) ведемо відносно цієї величини. При цьому змінюємо швидкість проточування  $\nu$ , а також коефіцієнт жорсткості  $k_1$ . Результати розрахунків представлені на рисунках 7 і 8.

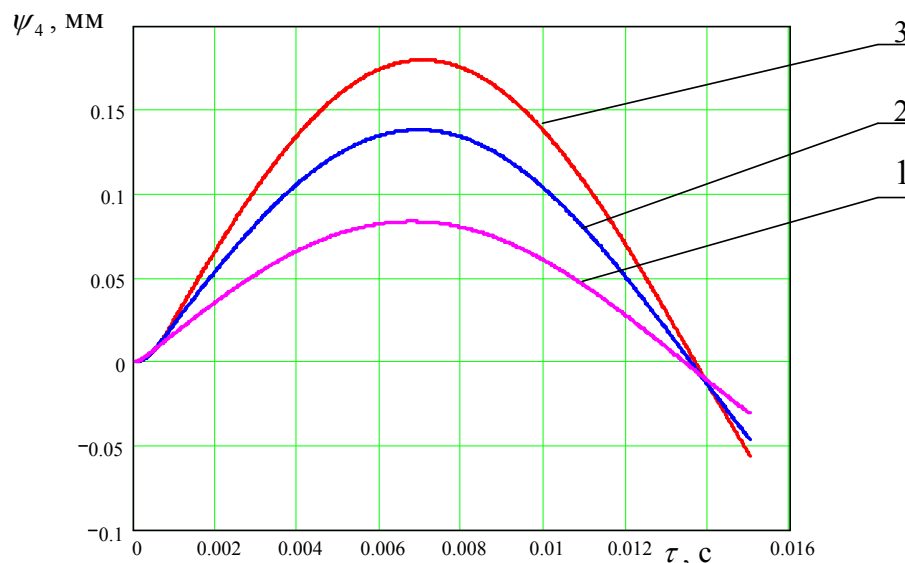


Рисунок 7 - Графік залежності величини відносної деформації  $\psi_4$  від часу.  
1)  $\nu=6,5$  м/с; 2)  $\nu=3$  м/с; 3)  $\nu=2,5$  м/с

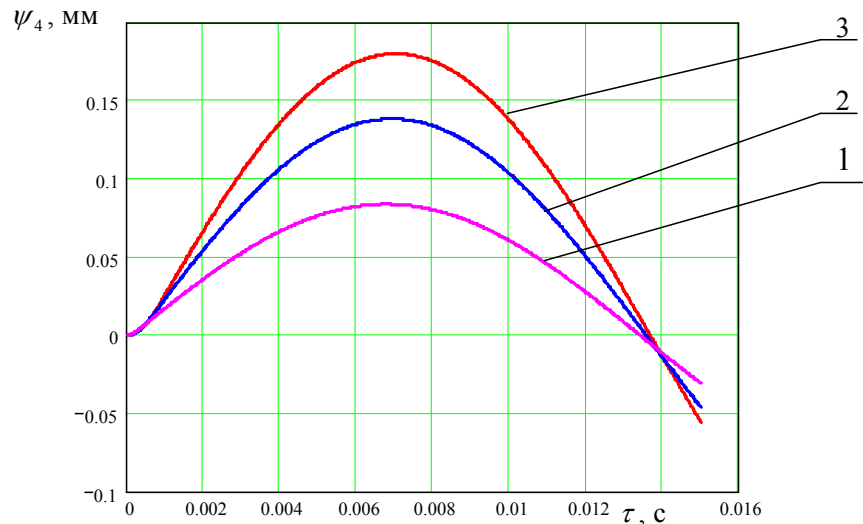


Рисунок 8 - Графік залежності величини відносної деформації  $\psi_4$  від часу.  
1)  $k_f=500$  Н/мм; 2)  $k_f=700$  Н/мм; 3)  $k_f=1000$  Н/мм

За графіками на рисунках 7 і 8 робимо висновок про доцільність підвищення швидкості розточування ГГЗ та жорсткості деформованого елемента ГГЗ, тому що при цьому зменшується деформація матеріалу ГГЗ, а отже, підвищується якість обробки.

### Висновки

У роботі представлено конструкцію пристрою для розточування внутрішніх отворів ГГЗ. Проведено аналіз динамічних навантажень на систему верстат-пристрій-деталь при розточуванні ГГЗ. Запропоновано динамічну систему даного процесу, на основі якої складено систему диференціальних рівнянь руху, що розв'язана чисельним методом. Досліджено величину деформації матеріалу гвинтової гофрованої заготовки в залежності від швидкості різання та жорсткості деформованої частини. Для того, щоб зменшити деформацію полотна ГГЗ, а отже, і підвищити якість обробки ГГЗ, необхідно зменшувати силу різання, збільшувати жорсткість полотна та підвищувати швидкість різання.

### Література

1. Гудь В.З. Динамічна модель процесу перервного розточування спірального шнека //Вісник Луцького аграрного університету. – Луцьк, 2003.- С.36-42.
2. Гевко Б.М., Драган А.П. Математичне моделювання процесу розточування гвинтових гофрованих заготовок //Науковий вісник Національного аграрного університету. – Київ: Ред. – вид. відділ НАУ, 2005. – Вип.. 92, Ч.2. – С. 39-46.
3. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1977. – 340с.
4. Павловський М. А. Теоретична механіка.– К.: Техніка, 2002. - 512 с.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. - 718с.
6. Патент №22332, Україна. Пристрій для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок. Гевко Б.М., Дячун А.С. Бюл. №5, 2007. – С.5.

Одержано 05.02.2008 р.