

## АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ПРИ РОЗВЕРТУВАННІ

**Малишко І.О., Кисельова І.В.**

(ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

При обробці отворів найбільш розповсюдженим видом обробки є обробка осьовими інструментами. Частота застосування таких інструментів у шість разів перевищує частоту застосування розточувальних різців і головок. Особливе місце серед осьових інструментів займають розвертки, які повинні забезпечити необхідну точність обробленого отвору. Однак цього не завжди можна досягти. Дослідження [1, 2] показали, що отвори, оброблені розвертками, можуть мати огранку, величина якої перевершує величину поля допуску на отвір. Причиною появи огранки є вимушені коливання технологічної системи. Джерелами цих коливань можуть бути нерівномірна твердість матеріалу заготовки, биття зубців розвертки, низька геометрична і кінематична точність верстата та інше.

Усунути всі джерела, що породжують коливання, не завжди є можливим. У той же час, наявність огранки отвору негативно впливає на експлуатаційні властивості деталей машин. Тому зменшення величини огранки є важливою проблемою.

Метою даної роботи є визначення шляхів підвищення точності оброблення отворів при розвертуванні за рахунок зменшення величини огранки.

Для усунення огранки запропоновані розвертки з нерівномірним розподілом зубців [1]. У цьому випадку зменшення огранки відбувається за рахунок зміни кінематики руху зубців розвертки і частоти її радіальних коливань.

При рівномірному розподілі зубців частота радіальних коливань розвертки визначається залежністю

$$\omega_p = \frac{\pi n_0 z}{15}, \quad (1)$$

де  $n_0$  – число оборотів розвертки;  
 $z$  – число зубців розвертки.

Розвертки, що забезпечують усунення огранювання отворів, повинні мати різницю кутових шагів  $\Delta\theta = 360^\circ/z^2$ . Тоді частота їхніх радіальних коливань визначається залежністю

$$\omega_n = \frac{(\pi \cdot 12)n_0}{\Delta\theta}. \quad (2)$$

З виразів (1) і (2) можна знайти співвідношення частот радіальних коливань розверток з рівномірним і нерівномірним розподілом зубців при однаковій частоті обертання:

$$\omega_n = \frac{180\omega_p}{z \cdot \Delta\theta}. \quad (3)$$

З рівняння (3) випливає, що частота радіальних коливань розвертки з нерівномірним кутовим шагом набагато більша, ніж для розвертки з рівномірним розподілом зубців, причому частота коливань залежить від числа зубців розвертки.

Залежність між числом зубців розвертки, величиною відхилення кутових шагів і частотою радіальних коливань представлена в таблиці 1.

Таблиця 1. Залежність між числом зубців розвертки, величиною відхилення кутових шагів і частотою радіальних коливань

Число зубців, $z$ , шт	Величина відхилення кутових шагів, $\Delta\Theta^\circ$	Частота радіальних коливань
6	10	$3\omega_p$
8	5,6	$4\omega_p$
10	3,6	$5\omega_p$
12	2,5	$6\omega_p$

З таблиці видно, що для розверток з перемінним розподілом зубців збільшення їх числа призводить до зменшення величини відхилення кутових шагів і збільшення частоти радіальних коливань. При великій частоті обертання розвертки збільшення частоти радіальних коливань може призвести до втрати сталості технологічної системи. Крім того, зміна частоти коливань призводить до зміни їхньої амплітуди, що безпосередньо впливає на величину огранки.

Підвищити точність оброблених отворів можна шляхом зменшення амплітуди радіальних коливань розвертки. Процес різання може демпфувати чи підсилювати вимушені коливання технологічної системи. Вибравши оптимальні конструктивні параметри розвертки і режими різання, можна досягти максимального демпфування радіальних коливань і звести величину огранки отворів до мінімуму.

Установлено, що найбільша похибка оброблення отворів виникає в період врізання розвертки в метал, коли сили на частині, що калібрує, незначні. Тому демпфіруючі властивості процесу різання доцільно оцінювати тільки виходячи із сил, що діють на головну різальну кромку розвертки.

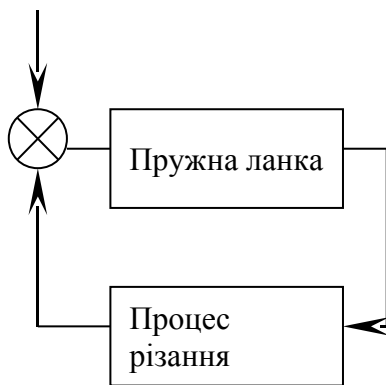


Рис. 1. Динамічна система «пружна ланка-процес різання»

Технологічну систему можна розглядати як замкнуту динамічну систему, що складається з двох ланок: пружної ланки розвертки і процесу різання, що являють собою замкнутий контур послідовно з'єднаних ланок (рис. 1).

Для визначення амплітуди радіальних коливань, викликаних зовнішніми впливами на еквівалентну пружну систему, Кудинов В.А. запропонував залежність[3]:

$$A_f = A_{xx} \frac{1}{A_{zn}}, \quad (4)$$

де  $A_{xx}$  – амплітуда змущених відносних коливань заготовки й інструмента при холостому ході верстата по напрямку, який відповідає зміні товщини шару, що зрізується, у даному випадку радіальна величина коливань припуску, мм;

$A_{zn}$  – амплітуда знаменника передаточної функції замкненої динамічної системи, мм.

Для всіх частот вимушених коливань, що відповідають  $A_{zn} < 1$ , процес різання підсилює коливання. При значеннях  $A_{zn} > 1$  процес різання демпфує коливання.

Для аналізу впливу конструктивних елементів і геометричних параметрів розвертки на амплітуду її вимушених коливань і величину огранки отвору необхідно визначити величину передаточної функції процесу різання.

При розвертуванні радіальні коливання не впливають на осьові і крутильні коли-

вання. Тому в подальших дослідженнях враховувалися тільки радіальні коливання.

Передаточна функція системи «пружна ланка розвертки - процес різання» має вид

$$\Phi_{(p)f} = \frac{W_{(p)y}}{1 + W_{(p)раз}}, \quad (5)$$

де  $W_{(p)y}$  – передаточна функція пружної ланки;

$W_{(p)раз}$  – передаточна функція розімкнутої системи.

У даному випадку пружною ланкою, що визначає точність обробки, є розвертка, жорсткість якої менше жорсткості шпindelного вузла верстата.

При послідовному з'єднанні ланок пружної системи їхні передатні функції перемножуються, тому передатну функцію системи «пружна ланка розвертки - процес різання» можна представити у вигляді

$$W_{(раз)} = W_{(p)p} W_{(p)y}. \quad (6)$$

Ступінь впливу процесу різання на амплітуду вимушених коливань розвертки, переданих їй верстатом, визначається радіальною складовою сили різання  $P_y$ .

Передаточна функція процесу різання по радіальній силі для сталих вимушених коливань має вигляд

$$W_{(P)P} = \frac{P_y}{X}, \quad (7)$$

Передаточна функція пружної ланки розвертки визначиться залежністю

$$W_{(P)Y} = \frac{Y}{\sum_{k=1}^z P_{yk}}, \quad (8)$$

де  $Y$  – величина переміщення розвертки;

$\sum_{k=1}^z P_{yk}$  – сума проекцій радіальних сил, що діють на кожен пару зубців, на вісь  $OY$ .

Динамічна характеристика для радіальної сили при вимушених коливаннях технологічної системи визначається залежністю [1]:

$$P_y = k q_c a_c [1 + T_\alpha(P)] Y, \quad (9)$$

де  $a_c$  – товщина зрізу, що відповідає рівномірному розподілу зубців;

$q_c$  – питома сила різання, що відповідає товщині зрізу  $a_c$ ;

$k$  – коефіцієнт, який визначається залежністю  $k = \sum_{k=1}^z \frac{2 \cos^2(\theta_k - \alpha_c) \cos(\varphi + \eta)}{\cos \lambda \sin \varphi}$ ;

$z$  – число пар зубців розвертки;

$\eta$  – кут відхилення руху стружки при невільному різанні, град.;

$\lambda$  і  $\varphi$  – кут нахилу головної різальної кромки і головний кут у плані розвертки відповідно, град.;

$\alpha_c$  – кут напрямку діючої радіальної сили, град.;

$\theta_k$  – різниця кутових кроків зубців розвертки, град.;

$p = (i\omega)$  – оператор диференціювання;

$T_\alpha$  – умовна постійна часу

$$T_\alpha = \frac{q_{zc}}{q_c} = \frac{C_e t_p}{BV_N^\alpha N_{cc}}.$$

Рівняння руху системи «пружна ланка розвертки - процес різання» у радіальному напрямку при наявності впливу, що збурює, виразиться залежністю

$$(T_1^2 P^2 - T_2 P - 1)y = \frac{\sum_{k=1}^z P_{yk}}{C_y}, \quad (10)$$

де  $T_1 = \sqrt{\frac{C_y}{m}} = \frac{1}{\omega_c}$  – інерційна постійна часу;

$T_2 = \frac{\beta}{C_y}$  – постійна часу демпфування;

$\beta$  – коефіцієнт сил опору.

Підставивши рівняння (10) у формулу передаточної функції пружної ланки (8), одержимо

$$W_{(p)y} = \frac{1}{[T_1^2(p)^2 - T_2(p) - 1]C}. \quad (11)$$

Для переходу від передаточної функції пружної ланки розвертки до амплітудно-фазової характеристики замінимо оператор  $(p)$  на  $(i\omega)$  і згрупуємо члени розвертки, що містять умовну одиницю. Після перетворення одержимо

$$W_{(\omega)раз} = U_{(\omega)} + iV_{(\omega)}, \quad (12)$$

де

$$U_{(\omega)} = \frac{Kq_c a_c [(1 - T_1^2 \omega^2) + T_2 T_\alpha \omega^2]}{[(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2] C} \quad \text{– дійсна частотна характеристика;}$$

$$V_{(\omega)} = \frac{Kq_c a_c [(1 - T_1^2 \omega^2) T_\alpha \omega^2 - T_2 \omega^2]}{[(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2] C} \quad \text{– умовна частотна характеристика.}$$

З отриманих формул видно, що при нерівномірному розподілі зубців розвертки величина огранки отвору визначається як динамічними процесами на зубцях розвертки, так і кінематикою її руху. Причому, величина огранки залежить від різниці кутових шагів  $\Delta \Theta$ .

Для будь-якого числа зубців розвертки існує мінімально припустима величина  $\Delta \Theta_{\min}$ , при якій величина огранки буде мінімальною. Частота коливань розвертки при відхиленні кутових шагів, яке дорівнює  $\Delta \Theta_{\min}$ , буде максимальною.

Величина огранки з урахуванням кінематики її утворення і динамічних процесів на головній різальній кромці, які викликані зовнішніми впливами на пружну ланку, можна представити у вигляді:

а) при  $\Delta \Theta < \Delta \Theta_{\min}$

$$\Delta_{ог} = K_f [A_{xx} + A_{xx} \cos Z(Z-1)\Delta \Theta];$$

б) при  $\Delta \Theta > \Delta \Theta_{\min}$

$$\Delta_{ог} = K_f [A_{xx} - A_{xx} \cos Z\Delta \Theta],$$

де  $K_f = \frac{1}{A_{3H}}$  – коефіцієнт сталості.

Рівняння (12) дозволяє проаналізувати вплив жорсткості під час вигину розвертки на точність оброблених отворів при зовнішніх впливах, викликаних, наприклад, коливаннями шпинделя верстата чи неспіввісністю розвертки і попередньо обробленого отвору. При зменшенні радіальної жорсткості шийки розвертки, що входить у знаменник рівняння (12), динамічний коефіцієнт  $K_f$  зменшується, отже точність отвору повин-

на підвищитися. Але зі зменшенням радіальної жорсткості зменшується подовжня жорсткості, що веде до збільшення розбивання отворів. Тому для підвищення точності оброблених отворів необхідно, щоб шийка розвертки мала достатню радіальну і подовжню жорсткість, але закріплення розвертки доцільно робити в патроні, що плаває.

Аналіз рівняння (9) показує, що сила демпфування збільшується при збільшенні довжини контакту головної різальної кромки розвертки з оброблюваним матеріалом. Цього можна досягти, наприклад, шляхом зменшення кута  $\lambda$ . Наявність негативного кута нахилу головної різальної кромки призводить до зменшення величини заднього кута, що також сприяє збільшенню сил демпфірування.

Експериментальні дослідження з визначення впливу схеми розподілу зубців на сталість процесу розвертування проводили на розвертках діаметром 16 мм з числом зубців  $Z = 8$  і кутом нахилу головної різальної кромки  $\lambda = -12^\circ$ . Режими різання складали:  $V = 3$  м/хв,  $S_0 = 1,6 \dots 2,5$  мм/об,  $t = 0,15$  мм. Як оброблюваний матеріал використовували сталь 45. Використовувались розвертки з рівномірним та нерівномірним розподілом зубців. Різниці кутових кроків  $\Delta \Theta$  змінювалися від  $0^\circ$  до  $10^\circ$ .

Середнє значення питомої сили різання на задній поверхні інструмента визначається границею текучості (для сталі 45  $\sigma_T = 350$  МПа). Постійні часу пружної ланки розвертки визначалися відповідно до методики, викладеної в роботі [3].

Експерименти показали, що частота коливань розвертки з рівномірним розподілом зубців складала  $\omega = 286$  с<sup>-1</sup>, для розверток з нерівномірним розподілом зубців вона зростала до  $\omega = 1036$  с<sup>-1</sup>. Амплітуда коливань розверток з рівномірним розподілом зубців складала 15 мкм.

Установлено, що при збільшенні різниці кутових кроків від 0 до  $\Delta \Theta_{\min}$  коефіцієнт сталості від зовнішніх впливів і частота коливань розвертки не змінюються. При значеннях  $\Delta \Theta > \Delta \Theta_{\min}$  частота коливань різко збільшується, а динамічний коефіцієнт прагне до нуля. Для розверток з нерівномірним кутовим кроком при частоті коливань  $\omega = 1036$  с<sup>-1</sup> амплітуда зменшилась до 5 мкм.

Збільшення різниці кутових шагів до  $\Delta \Theta \geq \Delta \Theta_{\min}$  сприяє збільшенню частоти коливань інструмента і зменшенню амплітуди цих коливань. Тобто для підвищення точності обробки отворів необхідно збільшувати частоту коливань інструменту за рахунок дотримання умови  $\Delta \Theta > \Delta \Theta_{\min}$ .

Крім того, проведені дослідження показали, що при частотах радіальних коливань розвертки більших чи рівних частоті власних коливань пружної ланки ( $\omega \geq \omega_c$ ) можлива втрата сталості технологічної системи. Тому розвертками з різницею кутових кроків  $\Delta \Theta \geq \Delta \Theta_{\min}$  необхідно працювати при низьких швидкостях різання, тобто в дорезонансній області.

При збільшенні подачі від 1,6 мм/об до 2,5 мм/об динамічний коефіцієнт збільшується, що пов'язане з ростом сил демпфування на задній поверхні зубців розвертки. Це призводить до підвищення сталості системи. Аналогічно впливає збільшення довжини головної різальної кромки при негативному куті  $\lambda$ .

На підставі виконаних досліджень встановлено, що сили, що діють на задню поверхню зубців розвертки відносяться до сил демпфування, і з їх ростом амплітуда коливань розвертки зменшується.

Отже, можна зробити висновок, що для підвищення точності обробки отворів при розвертуванні необхідно збільшувати сили, що діють на задню поверхню зубців за рахунок дотримання умови  $\Theta \geq \Delta \Theta_{\min}$  і збільшення довжини контакту головної різальної кромки розвертки з оброблюваною поверхнею шляхом вибору раціональної

величину кута нахилу головної різальної кромки  $\lambda$ .

**Список літератури:** 1. Малышко И.А. Основы теории проектирования осевых комбинированных инструментов: Диссертация докт. техн. наук 05.03.01. – Киев. 1996. – 430с. 2. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение. 1984. – 184 с. 3. Кудинов В.А. Динамика станков – М.: Машиностроение, 1967. – 430 с.

#### АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ПРИ РОЗВЕРТУВАННІ

Малишко І.О., Кисельова І.В.

Проаналізовано фактори, що впливають на точність обробки отворів при розвертуванні. Установлено, що підвищити точність обробки можна за рахунок збільшення сил, що діють на задню поверхню зубців розвертки.

#### АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ

Малышко И.А., Киселева И.В.

Проанализированы факторы, влияющие на точность обработки отверстий при развертывании. Установлено, что повысить точность обработки можно за счет увеличения сил, действующих на заднюю поверхность зубьев развертки.

#### ANALYSIS OF WAYS OF INCREASING OF HOLES MACHINING ACCURACY AT REAMING

Malishko I.A., Kyselyova I.V.

The factors being influential on holes machining accuracy at reaming are examined. It is established that the increase of machining accuracy is possible at the expense of rise of forces operating on a flank surface of reamer tooth.

Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.