

УДК 621.91.01

К. Р. Перевозник, В. К. Фролов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### Деформація інструментальної оправки під дією радіальної та осьової складових сили різання

Труднощі оброблення глибоких отворів, які мають підвищені вимоги до точності та шорсткості, пов'язані не лише з погіршенням умов відведення стружки та підведення змащувально-охолоджувальної рідини, але, головним чином, – з малою жорсткістю інструмента, яка прогресивно знижується зі збільшенням глибини та зменшенням діаметру отворів [1-3]. Зазвичай для розточування глибоких отворів використовуються довгомірні інструментальні оправки циліндричної форми. Відомо, що під час оброблення заготовки інструментальна оправка піддається впливам, які можуть вивести її зі стану рівноваги [4]. До таких впливів належить сила різання.

Система сил, що діють на інструмент при розточуванні, може бути зведена до однієї рівнодійної сили  $P$  – сили різання. Точка прикладання цієї сили знаходиться на головній різальній кромці.

Для інженерних розрахунків доцільніше використовувати не рівнодійну силу різання, а її складові, які діють в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. У загальному випадку рівнодійна сила розкладається на наступні складові:  $P_z$  – головна (тангенціальна) складова сили різання  $P$ , діє в площині різання в напрямку головного руху різання;  $P_y$  – радіальна складова сили різання  $P$ , направлена перпендикулярно до осі заготовки;  $P_x$  – осьова складова сили різання  $P$ , яка діє вздовж осі заготовки паралельно напрямку подачі.

На рис. 1 показано схему розточування отвору, а також представлено складові сили різання, які діють під час оброблення на інструмент.

Відомо, що при консольному кріпленні різального інструмента за рахунок дії радіальної складової сили різання може виникати похибка форми оброблюваного отвору. Наразі відомі дослідження, у яких розглядається вплив радіальної складової сили різання на точність оброблення отворів розточуванням [5-6].

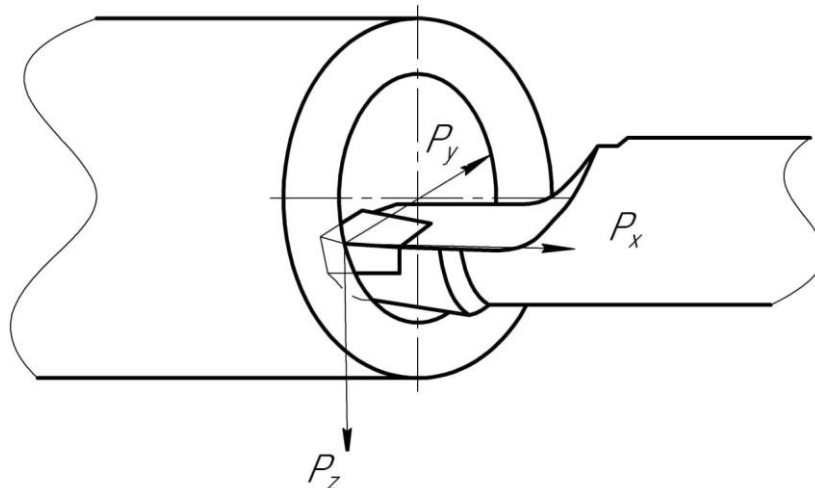


Рис. 1. Схема розточування отвору:

$P_z$  – головна (тангенціальна) складова сили різання;  $P_y$  – радіальна складова сили різання;  $P_x$  – осьова складова сили різання

Довгомірні інструментальні оправки, які використовуються для глибокого розточування, характеризуються тим, що розміри їх поперечного перерізу малі в порівнянні з довжиною оправки. У такому випадку оправку теоретично можна вважати «довгим стрижнем». При навантаженні довгого стрижня зовнішньою осьовою силою до нього висуваються вимоги щодо стійкості. Дія на інструмент радіальної складової сили спільно з дією осьової здатна спричинити ще більшу деформацію інструментальної оправки та може призвести до втрати нею стійкості. У відомій літературі не розглядався вплив спільної дії радіальної та осьової складових сил різання на точність оброблення отворів.

388

Метою роботи є дослідження деформації інструментальної оправки під дією радіальної та осьової складових сили різання.

На рис. 2 представлено схему навантаження інструментальної оправки радіальною  $P_y$  та осьовою  $P_x$  складовими сили різання.

У даному випадку поперечна деформація, спричинена дією сили  $P_y$ , ускладнена дією осьової сили  $P_x$ .

Ефективний коефіцієнт жорсткості  $c$  для схеми, зображеної на рис. 2, визначається як

$$c = \frac{P_y}{f}, \quad (1)$$

де  $f$  – максимальна деформація оправки.

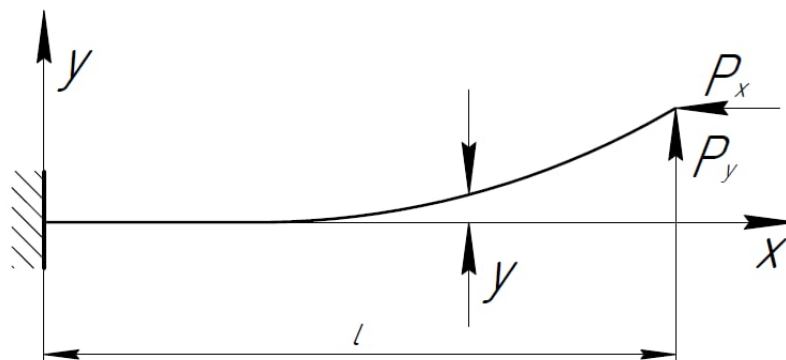


Рис. 2. Інструментальна оправка, навантажена радіальною  $P_y$  та осьювою  $P_x$  складовими сили різання ( $l$  – довжина оправки)

Запишемо рівняння згинаючого моменту  $M$  в довільному перерізі з врахуванням того, що початок системи координат розташований в точці закріплення оправки, вісь  $x$  напрямлена горизонтально вправо, а вісь  $y$  – вертикально вгору:

$$M = P_y(l - x) + P_x(f - y), \quad (2)$$

де  $y(x)$  – деформація довільного перерізу оправки.

Враховуючи, що  $M = y''EI$ , рівняння (2) набуває вигляду:

$$y'' = \frac{P_y(l-x)}{EI} + \frac{P_x(f-y)}{EI}, \quad (3)$$

де  $I$  – момент інерції поперечного перерізу,  $m^4$  (для круглого перерізу  $I = \pi \cdot D^4/64$ ),  $D$  – діаметр оправки, м;  $E$  – модуль пружності (для сталі  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа).

Вводимо заміну

$$k^2 = \frac{P_x}{EI}. \quad (4)$$

Диференційне рівняння вигнутої осі стрижня виглядає наступним чином:

$$y'' + k^2 y = \frac{P_y(l-x)}{EI} + k^2 f. \quad (5)$$

Отримаємо загальне рішення диференційного рівняння (5):

$$y = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + \frac{P_y}{P_x}(l - x) + f. \quad (6)$$

У початку координат ( $x = 0$ ) деформація становить  $y(x) = 0$ . Кутове переміщення в консольному кріпленні ( $x = 0$ ) також буде дорівнювати нулю:  $y'(0) = 0$ .

Отже, початкові умови для визначення коефіцієнтів:  $y(0) = 0$ ;  $y'(0) = 0$ .

Знаходимо першу та другу похідні диференційного рівняння:

$$y' = kC_1 \cos kx - kC_2 \sin kx - \frac{P_y}{P_x}; \quad (7)$$

$$y'' = -k^2 C_1 \sin kx - k^2 C_2 \cos kx. \quad (8)$$

Підставляючи початкові умови у рівняння (7) та (8), знаходимо значення постійних коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_2$ :

$$C_1 = \frac{P_y}{P_x k}; \quad (9)$$

$$C_2 = -\frac{P_y}{P_x} l - f. \quad (10)$$

Після підстановки (9) та (10) у (6) отримаємо:

$$y = \frac{P_y}{P_x k} \sin kx + \left(-\frac{P_y}{P_x} l - f\right) \cos kx + \frac{P_y}{P_x} (l - x) + f. \quad (11)$$

Відомо, що на кінці оправки  $y(l) = f$ . Враховуючи цю умову, отримаємо залежність:

$$f = \frac{P_y l^3 (\tan kl - kl)}{EI (kl)^3}. \quad (12)$$

Враховуючи введену вище заміну (4), зводимо рівняння (12) до наступного вигляду, отримуючи остаточну залежність для визначення максимальної деформації оправки під дією радіальної та осьової складових сили різання:

$$f = \frac{P_y l^3 (\tan \sqrt{\frac{P_x}{EI}} l - \sqrt{\frac{P_x}{EI}} l)}{\left(\sqrt{\frac{P_x}{EI}} l\right)^3}. \quad (13)$$

У випадку, коли осьова складова  $P_x$  сили різання відсутня ( $k \rightarrow 0$  або  $P_x \rightarrow 0$ ), отримаємо наступні тотожні границі функцій:

$$\lim_{k \rightarrow 0} f = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{P_y l^3 (\tan kl - kl)}{EI (kl)^3} = \frac{P_y l^3}{3EI}; \quad (14)$$

$$\lim_{P_x \rightarrow 0} f = \lim_{P_x \rightarrow 0} \frac{P_y l^3 (\tan \sqrt{\frac{P_x}{EI}} l - \sqrt{\frac{P_x}{EI}} l)}{\left(\sqrt{\frac{P_x}{EI}} l\right)^3} = \frac{P_y l^3}{3EI}. \quad (15)$$

Залежності (14) та (15) повторюють відому формулу для розрахунку деформації оправки, яка виникає під дією радіальної складової  $P_y$  сили різання, що підтверджує істинність отриманих залежностей (12) та (13).

## Висновки

1. Довгомірні інструментальні оправки при глибокому розточуванні характеризуються тим, що розміри їх поперечного перерізу малі у порівнянні з довжиною оправки. За таких умов оправка теоретично може вважатися довгим стрижнем. При дії на оправку зовнішньої поздовжньої сили вона при певних умовах може втрачати стійкість.

2. У результаті дослідження була отримана залежність для розрахунку максимальної деформації оправки, що спричинена сумарною дією радіальної та осьової складових сили різання.

## Список використаних джерел

1. Н. В. Тюкина. Особенности растачивания глубоких отверстий. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып.11. Ч.1. Стр. 189-103.

2. Повышение эффективности растачивания отверстий на токарных станках путем создания виброустойчивой инструментальной системы [Текст]: автореф. канд. техн. наук : 05.03.01 / В. В. Хорошайло. Донбасская государственная машиностроительная академия.

3. Отений Я. Н. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография / Отений Я. Н., Смольников Н. Я., Ольштынский Н. В.; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: РПК "Политехник", 2003. – 132 с.

4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с.

5. Перевозник Е.Р., Фролов В.К. К вопросу об устойчивости длинномерных инструментальных оправок. Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні - 2019», розділ «Технологія машинобудування». – Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019, стор. 335-341. <http://imm-mmi.kpi.ua/proc/article/view/164126> (дата звернення 01.05.2021 р.). – Назва з екрана.

6. Практическая технология: Учеб. пособие / Под ред. И. Б. Шачневой, Н. А. Ярославцевой. – М.: П692, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 84 с.: ил.