

До недоліків муфти можна віднести досить значні її аксіальні габарити та неможливість з'єднання валів нерухомих агрегатів (один з них, до з'єднання, повинен мати можливість руху в напрямку осі вала).

1. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник. В 3 т. Т. 1 / Под ред. Н.С. Ачеркана. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1968. – 440 с. 2. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / Под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. 3. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 4, кн. 1 / Под ред. Н.С. Ачеркана. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 448 с. 4. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.

УДК 621.91.01

В.П. Свізінський, В.В. Ступницький, Я.М. Пелех  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронного машинобудування

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ СВЕРДЛА ДЛЯ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ ДЕТАЛЕЙ

© Свізінський В.П., Ступницький В.В., Пелех Я.М., 2005

Описано методику досліджень коливань свердла під час свердління глибоких отворів. Запропоновано аналітичні залежності, що уможливають проводити теоретичний аналіз впливу окремих параметрів режиму різання, властивостей оброблюваного матеріалу та конструкції інструменту на вібростійкість свердла.

In paper the technique of research of oscillations of a drill is circumscribed during drilling a deep hole. The analytical dependences are offered which allow to produce the theoretical analysis of influence of separate parameters of modes of cutting, properties of a worked stock and construction of the tool on vibrational stability of a drill.

Основний вплив на процес різання мають відносні коливання інструменту та деталі. Від цих коливань в кінцевому вигляді залежить як стійкість та продуктивність роботи металорізального інструменту, так і якість оброблюваної поверхні (хвилястість, шорсткість, наклеп, залишкові напруження тощо). Особливо велике значення надається автоколиванням нежорсткого інструменту, до якого можна віднести свердла для глибокого свердління. Причому найбільш впливовими коливаннями є крутні коливання інструменту [1].

За крутних коливань свердла справедлива рівність

$$\overline{M}_{ин} + \overline{M}_{оп} + \overline{M}_{пр} + \overline{M} = 0, \quad (1)$$

де  $\overline{M}_{ин}$ ,  $\overline{M}_{оп}$ ,  $\overline{M}_{пр}$ ,  $\overline{M}$  – моменти сил відповідно інерції, опору, пружності та різання.

Інакше це можна записати у вигляді

$$I \frac{d^2\varphi(t)}{d(t)^2} + \eta \frac{d\varphi(t)}{d(t)} + C\varphi(t) = M, \quad (2)$$

де  $I$  – приведений момент інерції свердла;  $\eta$  – узагальнений момент опору;  $C$  – коефіцієнт жорсткості.

За значних крутних коливань стандартного дволезового свердла для глибокого свердління (ГОСТ) праву частину рівності (2) можна записати в такий спосіб:

$$M = M_p + M_1 + M_2 + B, \quad (3)$$

де  $M_p$  – момент сил від різальної частини свердла;  $M_1, M_2$  – моменти сил відповідно на першому та другому лезі калібрувальної частини свердла;  $B$  – додатковий сталий момент сил тертя від направляючої частини свердла.

У рівнянні (3) момент сили на першому лезі калібрувальної частини свердла:

$$M_1 = M_0 + K_p \delta \varphi(t), \quad (4)$$

де  $M_0$  – момент, що виникає внаслідок підрізання бічної сторони профіля леза свердла за статичного кута закручування (під статичним кутом закручування потрібно вважати кут закручування свердла під дією моменту  $M_p$ );  $K_p \delta \varphi(t)$  – додатковий момент, що виникає під час підрізання профілю за кутового відхилення свердла на величину  $\varphi(t)$  відносно статичного кута закручування;  $K_p$  – коефіцієнт різання.

Момент від калібрувальної частини леза свердла:

$$M_2 = \begin{cases} \left\langle \begin{array}{l} M_0 + K_p \delta [\varphi(t - \tau) - \varphi(t - T/2 - \tau)] \\ \text{при } \varphi(t - \tau) \geq \varphi(t - T/2 - \tau) \end{array} \right\rangle & \text{якщо } \varphi(t - \tau) \text{ і } \varphi(t - T/2 - \tau) \text{ одного знака " + " } \\ \left\langle \begin{array}{l} M_0 \\ \text{при } \varphi(t - \tau) < \varphi(t - T/2 - \tau) \end{array} \right\rangle & \text{якщо } \varphi(t - \tau) \text{ і } \varphi(t - T/2 - \tau) \text{ одного знака " - " } \\ \left\langle \begin{array}{l} M_0 + K_p \delta [\varphi(t - \tau)] \\ \text{при } \varphi(t - \tau) \text{ знаком " - " } \\ \text{при } \varphi(t - \tau) \text{ знаком " + " } \end{array} \right\rangle & \text{якщо } \varphi(t - \tau) \text{ і } \varphi(t - T/2 - \tau) \text{ одного знака " - " } \end{cases} \quad (5)$$

де  $T$  – час одного оберту свердла.

Аналітичні дослідження рівнянь (2) і (3), де моменти  $M_1$  і  $M_2$  визначені рівностями (4) і (5), є дуже складними і у цій роботі розглядатись не будуть. Як спрощений розрахунок, розглянемо випадок малих коливань свердла відносно статичного кута закручування.

За крутних коливань свердла відносно статичного кута закручування рівність (3) можна записати так:

$$M = M_p + M_0 + \varepsilon \cdot \sin(\omega t) + K_p \delta [2\varphi(t - \tau) - \varphi(t - T/2 - \tau)] + B, \quad (6)$$

де  $\varepsilon \cdot \sin(\omega t)$  – періодичне збудження моменту різання, що викликане відхиленням твердості матеріалу деталі та наявністю твердих включень, що переважають 5 % середньостатистичної твердості матеріалу. Позначимо  $M_p + M_0 + B = \text{const} = D$ . Тоді рівняння (2) може бути подане у вигляді

$$I \frac{d^2 \varphi(t)}{d(t)^2} + \eta \frac{d\varphi(t)}{d(t)} + C\varphi(t) = K_p \delta [2\varphi(t - \tau) - \varphi(t - T/2 - \tau)] + \varepsilon \cdot \sin \omega t + D. \quad (7)$$

Відлік кута повороту проводимо від статичного кута закручування

$$\varphi(t) = \varphi_{ст} + \varphi_1(t). \quad (8)$$

Тоді рівняння (7) запишемо у вигляді

$$I\ddot{\varphi}(t) + \eta\dot{\varphi}(t) + C\varphi(t) = K_p \delta [2\varphi(t - \tau) - \varphi(t - T/2 - \tau)] + \varepsilon \cdot \sin \omega t. \quad (9)$$

Вимушену складову рівняння (9) запишемо у вигляді

$$\varphi(t) = E \sin \omega t + F \cos \omega t. \quad (10)$$

Підставивши вираз (10) у рівняння (9) і виконавши у системі MATH CAD перетворення у символній формі, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} F[C - I\omega^2 - 2K_p \delta \cos \omega(T/2 - \tau)] + E[\eta\omega - K_p \sin \omega(T/2 - \tau)] &= 0 \\ -F[\eta\omega - K_p \sin \omega(T/2 - \tau)] + E[C - I\omega^2 - 2K_p \delta \cos \omega(T/2 - \tau)] &= \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Введемо позначення

$$\left. \begin{aligned} C - I\omega^2 - 2K_p \delta \cos \varpi(T/2 - \tau) &= a_1 \\ \eta\varpi - K_p \sin \varpi(T/2 - \tau) &= a_2 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Тоді рівняння (11) запишеться у вигляді

$$\left. \begin{aligned} Fa_1 + Ea_2 &= 0 \\ -Fa_2 + Ea_1 &= \varepsilon \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (13), отримаємо

$$E = \frac{a_1 \varepsilon}{a_1^2 + a_2^2}; \quad F = -\frac{a_2 \varepsilon}{a_1^2 + a_2^2}. \quad (14)$$

Вимушену складову рівняння (10) запишемо у вигляді

$$\varphi(t) = \frac{a_1 \varepsilon}{a_1^2 + a_2^2} \sin \varpi t - \frac{a_2 \varepsilon}{a_1^2 + a_2^2} \cos \varpi t. \quad (15)$$

Після нескладних перетворень, отримаємо

$$\varphi(t) = \varphi_A \sin \left[ \varpi t + \arctg \left( -\frac{a_1}{a_2} \right) \right]. \quad (16)$$

Залежність  $\varphi_A = \varepsilon / \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$  і є аналітичною інтерпретацією амплітуди крутих коливань свердла під час глибокого свердління отвору. Беручи до уваги прийняті у виразі (12) позначення, у повному вигляді отримаємо

$$\varphi_A = \frac{\varepsilon}{\sqrt{[C - I\omega^2 - 2K_p \delta \cos \varpi(T/2 - \tau)]^2 + [\eta\varpi - K_p \sin \varpi(T/2 - \tau)]^2}}. \quad (17)$$

За допомогою цього виразу можна здійснювати аналіз впливу окремих параметрів режиму різання та конструкції інструменту на вібростійкість свердла в процесі глибокого свердління.

Узагальнений коефіцієнт демпфування  $\eta$  доволі сильно впливає на величину амплітуд автоколивань. Ця залежність має гіперболічний характер. За значення  $\eta \geq 4000$  амплітуда автоколивань наближається до 0, тобто процес свердління в усіх випадках перебігає стабільно, без вібрацій. За зменшення  $\eta$  амплітуди автоколивань зростають спочатку повільно, а потім швидше. За значення  $\eta < 1500$  амплітуда автоколивань стає більшою за 0,5 мм, тобто процес свердління стає неможливим. Для більшості реальних процесів свердління коефіцієнт демпфування становить величину 3000–3500. За такого значення коефіцієнта максимальне значення амплітуд знаходиться в межах 40–150 мкм (за заданих умов обробки). Це загалом відповідає даним, отриманим проф. І.Г. Жарковим\*.

Залежність амплітуди автоколивань від жорсткості домінуючої коливальної системи  $C$  має приблизно аналогічний характер, проте гіперболічна залежність виражена дещо слабше. Так, за збільшення в реальних межах узагальненого коефіцієнта демпфування у півтора рази амплітуда автоколивань зменшується приблизно в 3 рази, то під час зростання жорсткості в 2 рази і амплітуди автоколивань зменшуються вдвічі.

Усе це дає змогу зробити висновок про пріоритетність зменшення автоколивань технологічними шляхами, а не конструктивними. Тобто доцільніше розробляти свердла, що мають можливість гасити автоколивання, а не створювати наджорсткі інструменти (особливо в умовах глибокого свердління).

\* Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.