

УДК 621.822

А.А. Ткачук, С.А Мороз

Луцький національний технічний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИГЛАДЖУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОІНДЕНТОРНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРУЖНОЇ ДІЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗОВНІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

В роботі виведені аналітичні залежності, які описують динамічну модель процесу вигладжування з використанням інструменту пружної дії. За допомогою використання отриманих залежностей є можливість прогнозувати кінцеві параметри хвилястості поверхонь обертання в результаті оброблення на викінчувально-вигладжувальних операціях.

Ключові слова: вигладжування, динамічна рівновага, аксіальний кулачковий механізм, гідростатичний тиск, вимушені коливання.

Параметри якості при обробці вигладжувальним інструментом пружної дії в значній мірі залежать від тиску в точці контакту «поверхня – індентор», який визначається параметрами заготовки та індентора (радіус кривизни, початкова шорсткість заготовки) і сили Q прикладеної до індентора. В нашому випадку прикладену до індентора силу Q забезпечує гідростатичний тиск робочої рідини Y_0 , що має ступінь стиску c (рис 1).

Якщо радіус заготовки не залежить від кута φ , тобто $\rho(\varphi) = \text{const} = \rho_{\text{ном}}$ немає відхилення від круглості), то величина Q визначається значенням попередньо заданого гідростатичного тиску Y_0 , отриманого під час налаштування системи. Тоді, в процесі обробки виконується рівняння $Q = Q_{\text{зад}} = \text{const}$ і в результаті забезпечується стабільність формування параметрів якості поверхневого шару по всій поверхні заготовки. Це ідеальний випадок.

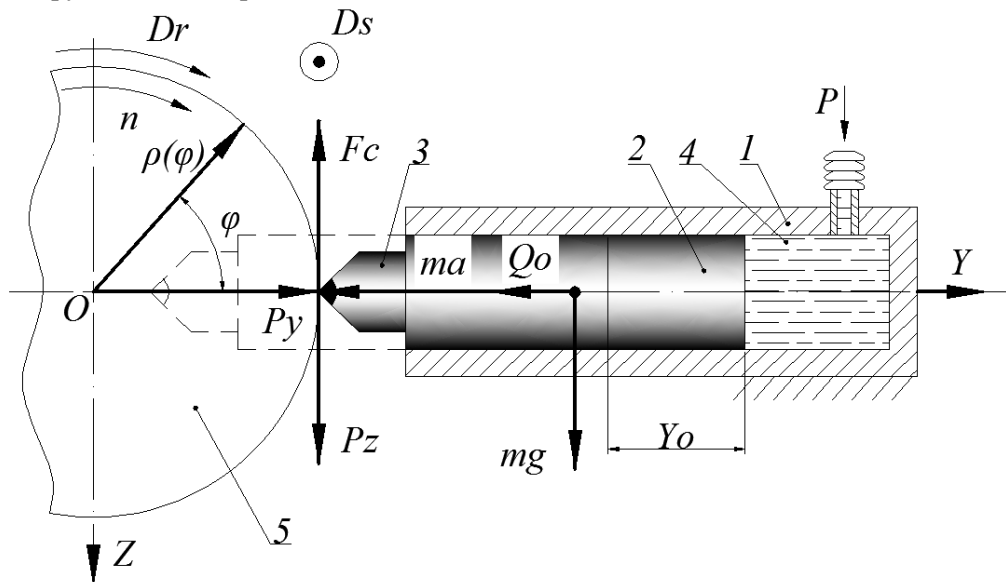


Рис. 1 Схема вигладжування зовнішніх циліндричних поверхонь: 1 – корпус інструменту; 2 – поршень; 3 – індентор; 4 – робоча рідина; 5 – заготовка

На реальних робочих поверхнях обертання виникають нерівності з різними кроком та амплітудою відхилень. Переміщення по робочих поверхнях обертання деталей машин описується складною періодичною функцією у вигляді ряду Фур'є, яка складається з простих гармонічних коливань з частотами, кратними основній.

Усі переміщення, спричинені недосконалістю оброблення робочих поверхонь, особливо хвилястістю, яка виникає під час точіння і остаточно формується на кінцевих операціях. Реальний профіль можна зобразити за допомогою графічної інтерпретації зміни геометричних параметрів, які впливають на поверхні обертання, що відповідає полярній діаграмі. Діаграму можна подати у вигляді замкненого контуру L , який в полярній системі координат описується

радіусом-вектором R , що залежить від полярного кута φ . В даному випадку аргументом є $x = \varphi$, а функцією – $R(\varphi) = f(x)$ [1].

Ряд Фур'є, використаний для математичного опису контуру L , має вигляд:

$$R(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\varphi + \psi_{0k}), \quad (1)$$

де a_0 - деяке постійне значення радіус-вектору;

k - номер гармоніки;

A_k - амплітуда k -ї гармоніки;

ψ_{0k} - початкова фаза гармоніки.

Співвідношення $\rho(\varphi) = const$ порушується під час вигладжування реального профілю при обробці поверхонь обертання. Прикладом циклічної зміни геометричних параметрів обертових поверхонь є кулачковий механізм, який виникає в результаті похибки форми поперечного перерізу заготовки (хвилястість), що виникає на попередніх операціях технологічного процесу механічної обробки. Ці фактори викликають переміщення вигладжувача вздовж осі Y та порушують динамічну рівновагу процесу, оскільки змінюється нормальна сила вигладжування Q , а отже і тиск в точці контакту. Таким чином, фактичний тиск в зоні контакту «поверхня - індентор» визначається при одному значенні Q за законами зміни профілю деталі в поперечному січенні, швидкості його обертання та динамічними властивостями пружного інструменту.

Розрахункова схема (рис. 1) відповідає за принципом дії аксіальному кулачковому механізму, де індентор 3 з поршнем 2 – є штовхачем з гідравлічним силовим замиканням, а оброблювана заготовка 5 – плоский кулачок.

Головна мета при розрахунку кулачкових механізмів – визначення профілю кулачка для забезпечення певного закону руху штовхача. При цьому до стабільності тиску в точці контакту «поверхня кулачка - штовхач» регламентованих вимог немає.

При динамічному розрахунку інструменту пружної дії для вигладжування вирішується зворотна задача: за фактично відомим профілем заготовки 5 потрібно визначити закон руху повзунка 2 з індентором 3 при заданій динаміці інструменту. При цьому необхідно вирішити наступні завдання:

1) визначити необхідну умову забезпечення постійного контакту індентора та поверхні, для уникнення відриву та виникнення ударної дії інструменту на заготовку;

2) виявити діапазон швидкостей вигладжування (V_{min}, V_{max}) або (n_{min}, n_{max}) в межах якого буде забезпечено сталість сили вигладжування Q в регламентованому діапазоні (Q_{min}, Q_{max}), який необхідно витримувати з метою формування параметрів якості поверхневого шару в заданих інтервалах з необхідним рівнем надійності.

В роботі наведено приблизне вирішення такої задачі, проте без врахування пружно-пластичної деформації в області контакту та сил тертя які присутні в процесі вигладжування. Згідно схеми (рис 1) профіль що оброблюється можна описати функцією $\rho = f(\varphi)$. Координата Y визначає положення індентора вздовж осі. Прискорення вигладжувача визначається рівнянням:

$$\ddot{y}(t) = \omega^2 f''(\varphi) = \omega^2 f''(\omega t) \quad (2)$$

де: $y(t) = f(\omega t)$ – закон переміщення вигладжувача; $\omega = 2\pi n$ – кутова швидкість обертання заготовки; n – число обертів за хвилину.

При дотриманні умови про постійний контакт вигладжувача з оброблюваною поверхнею має

місце рівняння:

$$f(\omega t) = f(\varphi) = p \quad (3)$$

тобто закон руху вигладжувача вздовж осі Y повністю визначається формою профілю поперечного січення оброблюваної заготовки (ряд Фур'є для математичного опису контуру L).

Постійний контакт обробки забезпечується при виконанні умови динамічної рівноваги [2] у відповідності з рівнянням Даламбера:

$$P_y + Q - M_{\ddot{y}} = 0 \quad (4)$$

де P_y – реакція заготовки на індентор;

$Q = c(y + Y_0)$ – тиск, що діє на повзунок;

$M = (m + m_{pc}/3)$ – приведена маса рухомих частин інструменту.

Для того, щоб індентор ніколи не відривався від поверхні повинно виконуватись наступне рівняння: $P_y \geq 0$. Тоді для граничного випадку $P_y = 0$ маємо:

$$M\ddot{y} \geq Q \quad (5)$$

З врахуванням (2) вираз (4) набуде вигляду:

$$-M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q + cy \quad (6)$$

Тут Q – зусилля, що створюється гідростатичним тиском при $y=0$ (забезпечується налаштуванням при початку обробки), c – ступінь стиску рідини.

У відповідності з (6) можна отримати умову забезпечення сили вигладжування в заданих межах $Q \in (Q_0 \pm \Delta Q)$:

$$Q_0 - \Delta Q \leq Q_0 + cf(\omega t) + M\omega^2 f''(\omega t) \leq Q_0 + \Delta Q \quad (7)$$

Стабільне забезпечення параметрів якості поверхневого шару при обробці потребує максимально можливого врахування всіх факторів, до яких відносяться геометричні характеристики похибок поперечного перерізу заготовки, сили тертя та в'язкого опору в зоні оброблення [3].

Запропоновано модель процесу в вигляді розрахункової схеми (рис. 2) включає в себе: інструмент для вигладжування, що складається з корпусу 1, рухомого поршня 2 з індентором 3 що притискається до заготовки 4 тиском створеним рідиною 5 з ступенем стиску c та силою $Q_0 = cY_0$. Номінальний переріз заготовки має форму окружності b радіусом ρ_0 . Фактичний переріз заготовки представлено у вигляді хвилястої кривої, яка має максимальну висоту W_{max} , кутовий крок хвилі φ_s , а номінальний профіль січення b являється середньою лінією m_w хвилястості, яка характеризує фактичний поточний радіус заготовки $\rho(\varphi)$, γ хвилястість заготовки.

В розрахунковій схемі передбачено дію наступних сил:

$Q_0 = cY_0$ – номінальне (задане) значення сили вигладжування;

Q – результуюча сила дії індентора на поверхню в точці контакту;

$m\ddot{y}$ – сила інерції рухомих частин інструменту;

P_y – сила реакції заготовки на індентор;

\overline{P}_z – сила опору вигладжуванню;

\overline{P} – результуюча сила вигладжування;

mg – маса рухомих частин інструменту;

$\overline{N}_1, \overline{N}_2$ – сила реакції на опорах поршня;

$\overline{F}_1, \overline{F}_2$ – сила тертя ковзання, що виникає при русі поршня;

$n\overline{Y}$ – сила в'язкого опору, пропорційна швидкості руху поршня.

Величина реакції N_1 та N_2 визначається з умови рівноваги поршня 2:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{(L+h)P \sin \gamma}{L} \\ N_2 = \frac{hP \sin \gamma}{L} \end{cases} \quad (8)$$

Якщо перемножити коефіцієнти N_1 та N_2 на коефіцієнт тертя f , отримаємо: $F_1 = fN_1$ і $F_2 = fN_2$ Критичний кут тиску γ_{kp} визначається з умови заклинювання повзуна:

$$\operatorname{tg} \gamma_{kp} = \frac{1}{f(1 + \frac{2h}{l})} \quad (9)$$

Аналіз розрахункової схеми дозволяє стверджувати, що модель процесу ППД зовнішніх
© А.А. Ткачук, С.А. Мороз

циліндричних поверхонь представляє собою нелінійну коливальну систему з одним ступенем вільності, яка виконує вимушені коливання при наявності сил в'язкого опору та тертя.

Джерелом збурень є залежність радіусу оброблюваної поверхні від кута φ , тобто функція $\rho(\varphi)$, джерелом якої є відхилення радіусу нормального січення оброблюваної поверхні від номіналу, які отримані під час попередньої обробки, що можна представити за допомогою ряду Фур'є.

Теорія коливань систем з одним ступенем вільності вивчена на достатньо високому рівні та розглядає різні випадки, до яких можна віднести вільні та вимушені коливання, коливання при в'язкому опорі при наявності сил тертя [4, 5].

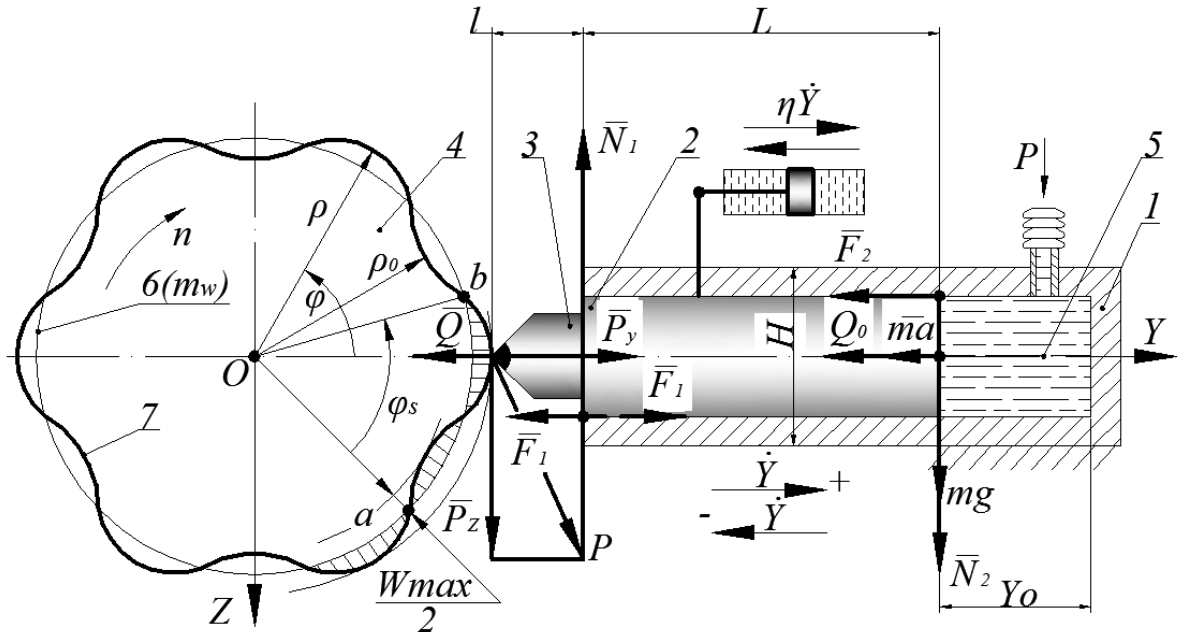


Рис. 2 Математична модель процесу вигладжування зовнішніх циліндричних поверхонь, що мають хвилястість, яка описується рядом Фур'є.

Без врахування можливості зміни маси отримаємо наступний вид рівняння руху системи з одним ступенем вільності:

$$m\ddot{y} + F(y, \dot{y}, t) = 0 \quad (10)$$

Тут $F(y, \dot{y}, t)$ – це наявність у рівнянні сил залежних від переміщення (сили пружності) $F(y)$, від швидкості (сили в'язкого опору) $F(\dot{y})$, та збурюючі сили $F(t)$, що залежать від часу.

Потрібно зауважати, що для нелінійних систем принцип накладання використовувати не можна, тобто збільшувати в 2 рази силу збурення, тому що відповідні переміщення нелінійної системи обов'язково будуть подвоюватись. В загальному випадку нелінійні коливання не є гармонічними і їх частоти змінюються в залежності від амплітуди. Але з метою спрощення вирішення технологічних завдань цим зазвичай нехтують тим самим знижуючи рівень точності.

Безумовно при цьому необхідно враховувати специфічні особливості обробки вигладжуванням реальних поверхонь. Під час вигладжувального оброблення поверхонь, що мають хвилястість, на інструмент як коливальну систему будуть діяти вимушені коливання, тобто коливання які викликає сила збурення $P = P(t)$.

З врахуванням співвідношення $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$, рівняння вимушених коливань поршня без врахування сил тертя та в'язкого опору матиме вигляд:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{P(t)}{m} \quad (11)$$

Формулу (11) прийемо за основу. До неї приводяться диференціальні рівняння коливань будь-якої механічної системи з одним ступенем вільності, при відсутності дисипативних сил. Якщо врахувати приведену силу збурення $P(t) = cf(t)$, то отримаємо наступний вигляд даного рівняння:

$$\ddot{Y} + \omega_0^2 \dot{Y} = \frac{cf(t)}{m} \quad (12)$$

Описане рівняння динаміки процесу вигладжування інструментом пружної дії більш зручне, адже при обробці поверхні вихідні відхилення від округлості утворюють саме кінематичні збурення $f(t)$ наприклад хвилястість W_{max} з кроком $\varphi_0 \rho_0$ (рис. 2).

При врахуванні в'язкого опору рівняння (12) вимушених коливань матиме вигляд:

$$\ddot{Y} + 2\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m} \quad (13)$$

Оскільки реальний профіль оброблюваної поверхні δ (рис. 2) є неперервною диференційною функцією, то його можна представити у вигляді суми синусоїд шляхом розкладу в ряд Фур'є. Тоді для кожної гармоніки величина $f(t)$ буде гармонічним збуджуючим коливанням, а $P(t) = cf(t)$ – гармонічною збуджуючою силою. Для даного випадку вона виражається:

$$P(t) = P_0 \sin(\omega t) = \frac{cf_0}{m} \cdot \sin(\omega t) \quad (14)$$

а встановлені коливальні рухи поршня будуть розв'язком рівняння (14):

$$Y = a \sin(\omega t - \gamma) \quad (15)$$

де, a та γ :

$$a = \frac{Y_{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}} \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2\omega n}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (17)$$

де,

$$Y_{cm} = \frac{P_0}{c} = \frac{P_0}{m\omega_0^2} \quad (18)$$

Рівняння (18) представляє собою амплітудно-частотну характеристику коливань вигладжувального інструменту.

Виведені аналітичні залежності, які описують динамічну модель процесу вигладжування з використанням інструменту пружної дії дають можливість встановити відносний рух вигладжувального інструменту щодо заготовки, таким чином можна прогнозувати кінцеві параметри хвилястості в процесі оброблення поверхонь обертання на викінчувальних операціях.

1) Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. – Житомир: ТТІ, 2001. – 612с.

2) Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Унвер У. Колебания в инженерном деле. / Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; Под ред. Э. И. Григолюка. - М. Машиностроение, 1985.- 472 с;

3) Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. - Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976 - 320 с;

4) Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания / Пер. с 4-го американского издания А. Н. Обморшева. - М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. -580 с;

5) Яблонский А. А., Норейко С. С. Курс теории колебаний - М: Высш. шк., 1966.-256 с;