

М.Д. Пархоменко, дир-р ІОЦ, О.Д. Криськов, проф., канд. техн. наук,
Ю.М. Пархоменко, асист.

Кіровоградський національний технічний університет

Визначення динамічної моделі об'єкту управління осьовим зусиллям при фрикційному формоутворенні

В даній статті розглянуто методику визначення динамічної моделі об'єкту управління осьовим зусиллям, що діє в робочій зоні формоутворення при виготовленні деталей за методом фрикційного формоутворення. За результатами експерименту побудовано розгінні криві та визначено передаточну функцію осьового зусилля за методом М.П. Симою
динамічна модель, осьове зусилля, фрикційне формоутворення, розгінна крива, метод М.П. Симою

Технічний прогрес у машинобудуванні знаходить своє відображення у такому розвитку виробництва, який забезпечує раціональне використання металу при високій продуктивності праці, малих енерговитратах та прийнятному рівні якості. Тому сучасна технологія машинобудування характеризується безперервним пошуком методів та засобів економного використання металів при виготовленні деталей машин. Одним із таких технологічних напрямків є метод фрикційного формоутворення деталей. Це нова технологія, яка дозволяє підвищити коефіцієнт використання металу в декілька разів порівняно з виготовленням цих же деталей, наприклад, методом різання.

Технологія фрикційного формоутворення [1, 2, 3] базується на гарячому пластичному деформуванні матеріалу заготовки. Необхідну пластичність матеріалу забезпечує тепло, що виділяється на робочій поверхні заготовки – місці її контакту з тручим і одночасно деформуючим інструментом (ТДІ). Тепловиділення є результатом перетворення механічної роботи сил тертя, що виникають під дією осьового тиску в площині контакту заготовки та ТДІ при їх відносному обертанні. В залежності від матеріалу заготовки температура пластичного деформування в робочій та примикаючій до неї кореневій зоні формоутворення може бути різною. Наприклад, для заготовки з латуні ЛС59-1 температура робочої поверхні та кореневої зони в момент формоутворення досягає $650 \div 750^{\circ} \text{C}$. Під дією осьової сили притискання тручий та деформуючий інструмент занурюється в заготовку і витискає розігрітий до пластичного стану метал на периферію. Скупчуючись, охолоджуючись і твердіючи навкруги ТДІ, цей метал утворює деталь. Зовнішнє радіальне формоутворення забезпечується обкатуючими валками. Такий процес може бути корисним при виготовленні вісесиметричних деталей.

Процес фрикційного формоутворення є результатом дії декількох рухів, основними з яких є відносне кутове та лінійне переміщення ТДІ і заготовки. Існує два види керування лінійним відносним переміщенням: 1) при постійній силі тиску на робочій поверхні; 2) при постійній швидкості лінійного переміщення. В даному випадку розглядається другий вид керування, який реалізується на діючих верстатах кулачковою системою управління на основі архімедової спіралі. Змінюючи профіль кулачків можна отримати будь-яку швидкість осьового руху формоутворюючого органу.

За один оберт розподільчого валу здійснюється повний цикл виготовлення деталі, часова діаграма якого представлена на Рис.1.

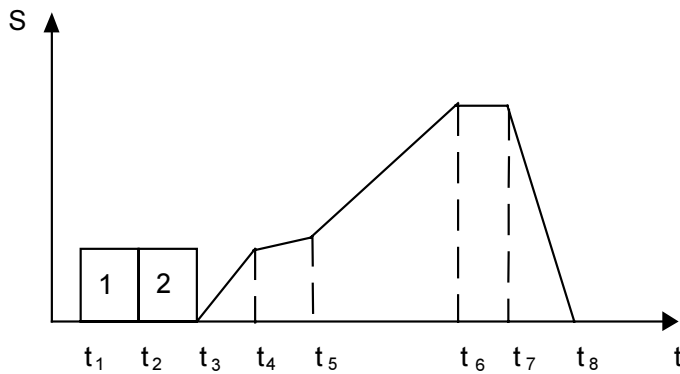


Рисунок 1- Етапи виготовлення деталі

Кожний такий цикл складається з наступних етапів:

$t_1 - t_3$ - підготовчі операції;

$t_3 - t_4$ - поступальний рух ТДІ до моменту дотику з заготовкою;

$t_4 - t_5$ - притирання та розігрів робочої області до моменту, коли заготовка починає пластично текти;

$t_5 - t_6$ - робочий хід процесу формоутворення – занурення ТДІ;

$t_6 - t_7$ – зупинка ТДІ, калібровка форми, вивід ТДІ з робочої форми;

$t_7 - t_8$ – зворотній рух ТДІ, охолодження напівфабрикату та доробка різанням.

Основним змінним параметром формоутворюючого руху є осьова сила, яка викликає позитивні переміщення в системі (етапи $t_1 - t_3$, $t_3 - t_4$, $t_5 - t_6$, $t_6 - t_7$, $t_7 - t_8$) (Рис.1) і спричиняє появу пружних деформацій в момент дотику заготовки і ТДІ. Продовження руху формоутворюючого інструмента після дотику (етап $t_4 - t_5$) спричиняє різкий зріст осьового зусилля, яке приводить до проковзування та деформації холодної заготовки, впливає на стійкість конструкції та стабільність технологічного процесу. Діюча кулачкова система управління не спроможна забезпечити регулювання швидкості руху ТДІ після дотику до заготовки із-за відсутності зворотного зв'язку. Щоб подолати цей недолік, необхідно впровадити замкнуту цифрову систему автоматичного керування швидкістю руху ТДІ, яка буде вступати в дію після кожного сигналу – сповіщення від датчика про дотик формоутворюючого елемента до заготовки.

Для того, щоб розробити означену систему спершу необхідно визначити динамічну модель (передаточну функцію) об'єкту управління - області формоутворення, вихідним параметром якої є осьове зусилля P , що виникає в місці дотику заготовки та ТДІ, за кривою розгону. З цією метою було проведено ряд експериментів по виготовленню деталей за діючою технологією, в результаті яких були отримані розгінні криві осьового зусилля (Рис.2). При визначенні розгінних кривих в експерименті були задіяні: тензометрична станція „Топаз 3-3-01” з тензометричним мостом, встановленим на коромислі кулачкового механізму подачі заготовки; світлопроменевий осцилограф Н0712 та дзеркальний гальванометр ($f_{max} = 15$ КГц). Калібровка вимірювальної системи забезпечувала максимальне зусилля – 500 кГ при дозволяючій здатності – 1 кГ.

Аналіз можливості використання методу дотичної до точки перегину кривої розгону (точки переходу кривої від режиму прискорення до режиму уповільнення) – при визначенні передаточної функції інерційної ланки першого порядку та методу Орманса, який дозволяє знаходити постійні часу T_1 , T_2 - при визначенні моделі передаточної функції другого порядку показав недоцільність їх застосування, так як значення нормованої розгінної кривої осьового зусилля (Рис.3) в момент часу $t_4 = 0,167$ с, визначений за формулою $t_4 = t_7/3$, де $t_7 = 0,5$ с відповідає значенню $P_7 = 0,7$ нормованої кривої, $P_4 = 0,17$ менше фіксованої величини 0,19 ($P_4 < 0,19$). Тому при визначенні передаточної функції досліджуємого об'єкта було використано метод інтегральних площин (метод М. П. Симою). Цей метод дозволяє апроксимувати

розгінну криву об'єкта управління з самовирівнюванням передаточною функцією виду [2]:

$$W_M(s) = K\overline{W}_M(s)e^{-s\tau} = K \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} e^{-s\tau}, \quad (1)$$

де K – коефіцієнт підсилення, τ – час запізнення, a_i, b_i – коефіцієнти передаточної функції, $\overline{W}_M(s) = \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}$ – передаточна функція нормованої розгінної кривої.

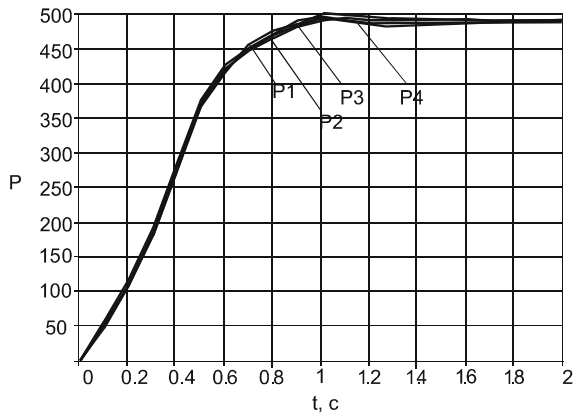


Рисунок 2 - Розгінні криві об'єкту управління осьовим зусиллям

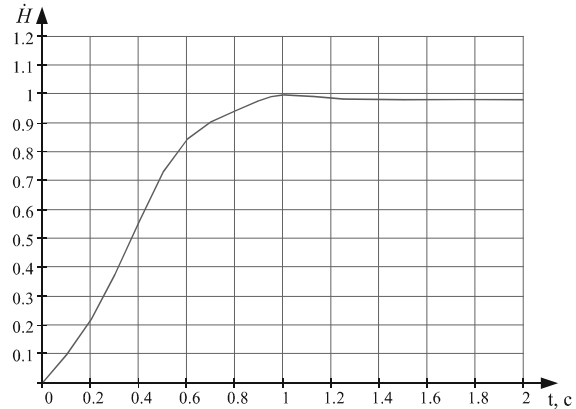


Рисунок 3 - Нормована крива об'єкту управління осьовим зусиллям

Згідно розробленої методики коефіцієнти a_i, b_i передаточної функції визначаються на основі лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 + S_1, \\ a_2 &= b_2 + b_1S_1 + S_2, \\ a_3 &= b_3 + b_2S_1 + b_1S_2 + S_3, \\ &\dots \\ a_k &= b_k + S_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i S_{k-i}. \end{aligned} \quad (2)$$

де коефіцієнти розкладу S_k названі М.П. Симою площинами.

Для визначення площин S_k вводиться зворотна від нормованої $\overline{h}(t)$ допоміжна функція $\varphi(t)$ (3). Зображення цієї функції по Лапласу розкладається в ряд Тейлора.

$$\varphi(t) = 1 - \overline{h}(t) \quad (3)$$

Коефіцієнти розкладення $\mu_k(t)$ носять назву моментів допоміжної функції $\varphi(t)$, які можуть бути обчисленими безпосередньо із графіку функції (Рис.4). Для цього уся площина, обмежена кривою $\varphi(t)$, розбивається на n малих площин ($n = 20$) шириною

$$\Delta t = \frac{T_n}{n} = \frac{2c}{20} = 0,1c, \text{ на підставі яких визначаються моменти } \mu_k(t) \text{ допоміжної функції } \varphi(t) \quad (4)$$

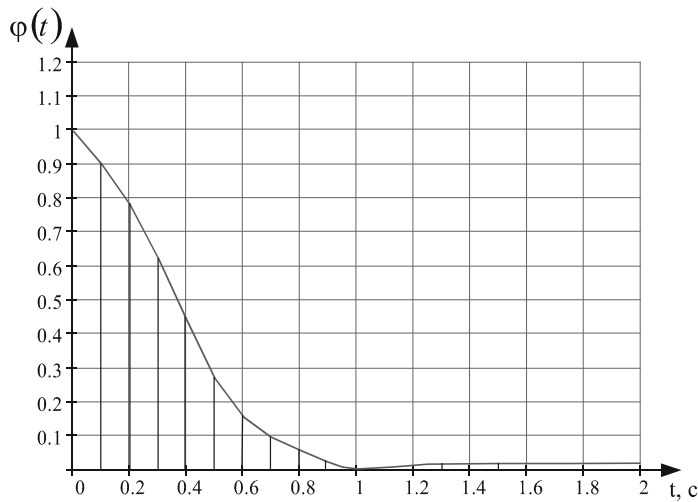


Рисунок 4 - Графік функції $\varphi(t) = 1 - \bar{h}(t)$

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \int_0^{\infty} \varphi(t) dt, \\ \mu_1 &= \int_0^{\infty} (-t) \varphi(t) dt, \\ \mu_2 &= \frac{1}{2!} \int_0^{\infty} (-t)^2 \varphi(t) dt, \\ \mu_k &= \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} (-t)^k \varphi(t) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Залежність між площинами S_k та моментами $\mu_k(t)$ допоміжної функції $\varphi(t)$ визначається рівняннями (5).

$$\begin{aligned} S_1 &= \mu_0, \\ S_2 &= \mu_0 S_1 + \mu_1, \\ S_3 &= \mu_0 S_2 + \mu_1 S_1 + \mu_2, \\ S_k &= \mu_{k-1} + \sum_{i=0}^{k-2} \mu_i S_{k-1-i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для обчислення інтегралів (4) використовувався метод трапецій, згідно з яким моменти $\mu_k(t)$ визначаються за формулами (6).

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \Delta t \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \varphi(i\Delta t) + 0.5\varphi(0) \right\} = \Delta t \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (1 - \bar{h}(i\Delta t)) + 0.5(1 - \bar{h}(0)) \right\}, \\ \mu_1 &= \Delta t \sum_{i=1}^{n-1} (-i\Delta t) \varphi(i\Delta t), \\ \mu_2 &= \frac{\Delta t}{2!} \sum_{i=1}^{n-1} (-i\Delta t)^2 \varphi(i\Delta t), \\ \mu_k &= \frac{\Delta t}{k!} \sum_{i=1}^{n-1} (-i\Delta t)^k \varphi(i\Delta t). \end{aligned} \quad (6)$$

Після підстановки значень $\varphi(i\Delta t)$ (Рис.4) в формули (6) визначимо моменти μ_0, μ_1, μ_2 , на підставі яких за формулами (5) визначимо площини $S_1 \div S_3$.

$$S_1 = 0,388, \quad S_2 = 0,051, \quad S_3 = 0,0017 \quad (7)$$

Виходячи з припущення, що поліном чисельника (1) на 2-3 ступеня менше знаменника ($m < n$, $b_i = 0$), передаточну функцію нормованої кривої $\bar{h}(t)$ визначимо за формулою (8)

$$\bar{W}_M(s) = \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}, \quad n = 3, \quad m = 0. \quad (8)$$

В даному випадку значення коефіцієнтів передачі a_i , визначені за формулами (2), будуть співпадати з величинами розрахованих площин S_i

$$a_1 = S_1 = 0,388, \quad a_2 = S_2 = 0,051, \quad a_3 + S_3 = 0,0017 \quad (9)$$

Підставимо отримані значення коефіцієнтів передачі a_i в формулу (8) – в результаті передаточна функція нормованої кривої $\bar{h}(t)$ прийме вид

$$\bar{W}_M(s) = \frac{1}{1 + 0,388 \cdot s + 0,051 \cdot s^2 + 0,0017 \cdot s^3} \quad (10)$$

Так як значення a_3 значно менше інших коефіцієнтів передачі, то ним можна знехтувати.

Коефіцієнт підсилення $K = K_{об}$ об'єкта управління визначається із співвідношення

$$K_{об} = \frac{\Delta \bar{P}(\infty)}{\Delta x} = \frac{500 \kappa \Gamma}{220 B} = 2.273 \kappa \Gamma / B \quad (11)$$

де Δx – значення вхідного діяння – напруги живлення двигуна подачі, $\Delta \bar{P}(\infty)$ – максимальне значення осьового зусилля.

Так як розгінна крива осьового зусилля знімалася на діючому верстаті при неперервній подачі ТДІ до заготовки і після дотику, то час запізнення приймаємо рівним нулю ($\tau_s = 0$). Підставимо в формулу (1) значення коефіцієнта підсилення K (11), постійну запізнення $e^{-p\tau_s} = 1$ і передаточну функцію нормованої кривої $\bar{W}_M(s)$. В результаті отримаємо кінцеву формула передаточної функції досліджуємого об'єкта, яка визначається виразом:

$$W_{об}(s) = \frac{2.273}{0.051 \cdot s^2 + 0.388 \cdot s + 1} \quad (12)$$

На основі отриманої динамічної моделі можна спроектувати замкнуту цифрову систему керування осьовим зусиллям спроможну забезпечувати стабільність технологічного процесу виготовлення деталей за методом фрикційного формоутворення.

Список літератури

1. Криськов О.Д. Технологія фрикційного формоутворення. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2008. – 303с.
2. Косматенко К.Є., Криськов О.Д., Пархоменко М.Д. Шляхи стабілізації автоматизованого процесу фрикційного формоутворення. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомч. наук. – техн. зб-к. – Кіровоград: КДТУ, 2002. - №32. – С.150-153.
3. Криськов О.Д., Косматенко К.Є., Пархоменко Ю.М. Передумови вибору конструкції шпindelного вузла верстату автомата фрикційного формоутворення //Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наук. Праць. – Кіровоград: КДТУ, 2002. - Вип. 11.
4. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования. Автоматика и телемеханика, 1957 г., № 6, с.514–527

В данной статье рассмотрена методика определения динамической модели объекта управления осевым усилием, которое действует в рабочей зоне формообразования при изготовлении деталей методом фрикционного формообразования. По результатам эксперимента построены разгонные кривые и определена передаточная функция осевого усилия по методу М.П. Симою

In this article is considered a method of determination of dynamic model of object management axial effort which operates in the working area of formcreation at making of details the method of friction formcreation. On results of experiment starting curves are built and the transmission function of axial effort is certain on the method of M.P. Simoyu