

УДК621.82

О.М. Кондратюк¹, Р.М. Котик²¹Національний університет водного господарства та природокористування²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ГВИНТОВИХ ГОФРОВАНИХ ЗАГОТОВОК**

Представлено конструкцію верстату для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем гофр. Особливістю конструкції є те, що механізм гофроутворення в межах формувальних зубчастих коліс на певних ділянках має спеціальний профіль – завишений або занижений для утворення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем, в яких частина впадин між зубами, яка формує гофровану поверхню, є змінена в межах зазору між зубами і товщиною заготовки, а частина зубів є нормальною.

Також запропонований метод розрахунку для визначення режимів оброблення дає можливість визначити послідовність згаданих переміщень ланок виконавчих механізмів, які забезпечують реалізацію заданих питань вихідного технологічного завдання; розрахувати траєкторію руху формуючого інструменту і підготувати необхідну документацію; використовувати отримані аналітичні залежності для розрахунку і проектування необхідного технологічного устаткування та формуючого інструменту; в процесі проектування нового обладнання правильно вибрати кінематику виконавчих органів верстату.

Ключові слова: технологічний процес, гвинтові гофровані заготовки, калібрування спіралі на крок, проектування.

А.Н. Кондратюк¹, Р.М. Котик²¹Национальный университет водного хозяйства и природопользования²Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК**

Представлены конструкцию станка для изготовления винтовых гофрированных заготовок с различным профилем гофр. Особенностью конструкции является то, что механизм гофроутворення в пределах формовочных зубчатых колес на определенных участках имеет специальный профиль - завышена или занижена для образования винтовых гофрированных заготовок с различным профилем, в которых часть впадин между зубами, которая формирует гофрированную поверхность, является изменены в пределах зазора между зубами и толщиной заготовки, а часть зубов является нормальной.

Также предложен метод расчета для определения режимов обработки дает возможность определить последовательность согласованных перемещений звеньев исполнительных механизмов, обеспечивающих реализацию заданных вопросов исходного технологического задания; рассчитать траекторию движения формообразующего инструмента и подготовить необходимую документацию; использовать полученные аналитические зависимости для расчета и проектирования необходимого технологического оборудования и формообразующего инструмента; в процессе проектирования нового оборудования правильно выбрать кинематику исполнительных органов станка.

Ключевые слова: технологический процесс, винтовые гофрированные заготовки, калибровки спирали на шаг, проектирование.

O. Kondratyuk¹, R. Kotyk²¹National University of Water Management and Nature Management²Ternopil Ivan Puluj National Technical University**FEATURES OF DESIGNING CORRUGATION SCREW BLANK**

The design of the machine tool for the production of corrugation screw blank with a different profile of corrugation is presented. The peculiarity of the design is that the mechanism of corrugation within the forming gear wheels in certain areas has a special profile - high or low for the formation of screw corrugated billets with different profiles in which the part of the cavities between the teeth forming the corrugated surface are changed within the gap between teeth and thickness of the workpiece, and part of the teeth is normal.

Also, the proposed method of calculation for determining the modes of processing makes it possible to determine the sequence of coordinated displacements of the links of executive mechanisms, which ensure the implementation of the issues of the original technological problem; calculate the trajectory of the movement of the shaping tool and prepare the necessary documentation; use the obtained analytical dependencies for the calculation and design of the necessary technological equipment and mold-making tool; in the process of designing a new equipment correctly choose the kinematics of the executive bodies of the machine.

Key words: technological process, corrugation screw blank, calibration of spiral to step, screw preparation, designing.

Постановка проблеми. Механізми з гвинтовими робочими органами отримали широке застосування в різних галузях народного господарства України та за її межами, завдяки концентрації різних технологічних операцій у поєднанні з транспортуванням. До основних переваг гвинтових механізмів (ГМ) відносяться неперервність переміщення насипних вантажів, простота

конструкції і надійність в експлуатації, можливість повної автоматизації із застосуванням регулювання і контролю, транспортування вантажів по криволінійних траєкторіях та інше.

В машинобудуванні навівання широкосмугових гвинтових робочих органів можна здійснювати двома методами: прокатуванням і навіванням. Технологічний процес навівання гвинтових заготовок (ГЗ) порівняно з прокатуванням має ряд переваг, зокрема товщина зовнішньої кромки складає 0,1...0,2 мм на 1 мм товщини проти 0,3...0,6 мм для прокатування. При цьому при прокатуванні товщина зовнішньої кромки у 1,5...2,6 рази менша ніж внутрішньої. Це важливий фактор підвищення експлуатаційної надійності та довговічності навівних заготовок порівняно з прокатуванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями розроблення та дослідження параметрів заготовок присвячені праці Зубцова М.Е. [1], Попова Е.А. [2], Лисового М.И. [3], Шевченка К.Н. [4], Гевка Б.М. [5], Романовського В.П. [6], Пилипця М.І. [7], Аверкієва Ю.А. [8], Васильківа В.В. [9], Грузьдева І.Є. [10], Мошніна Е.Н. [11] та багато інших. Однак цілий ряд питань виготовлення широкосмугових гвинтових робочих органів із змінними кроками потребують свого подальшого вирішення. Тому дана тема є актуальною та має важливе народногосподарське значення.

Постановка завдань. В роботі представлено мету - розроблення методики проектування гвинтових гофрованих заготовок і пристрою для їх виготовлення.

Викладення основного матеріалу. Пристрій для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем гофр зображено на рис.1, який виконано у вигляді станини 1, до якої жорстко закріплено електродвигун 2, коробку швидкостей 3 і механізм формоутворення, який складається з механізму радіального підтиску 4 з формувальним роликком 5 і рукояткою регулювання величини підтиску 6. Механізм гофроутворення і подачі заготовки встановлено перед механізмом приводу перпендикулярно до його осі і виконано у вигляді привідної оправки 7 з індивідуальним приводом (на кресленні не показано), двох конічних гофроутворюючих коліс 8, з різним профілем гофр на діаметри, які між собою погоджені і механізму радіального підтиску 9, рух якого у горизонтальній площині здійснюється за допомогою рукоятки 10.

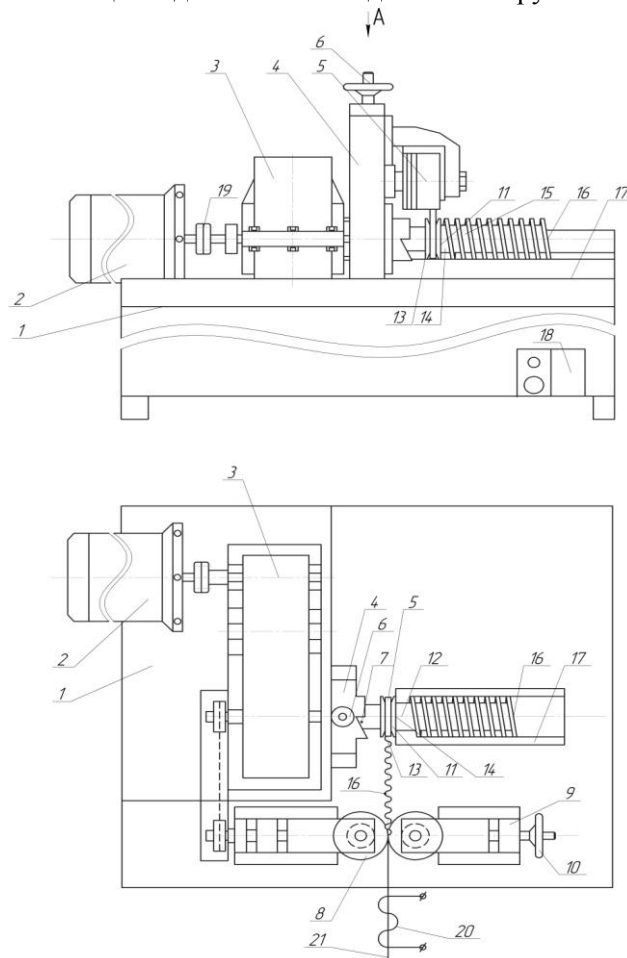


Рис.1. Пристрій для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем гофр

Механізм калібрування гвинтової гофрованої заготовки 11 виконано у вигляді оправки 12 на якій жорстко встановлена конічна калібрувальна шестерня 13, яка з правого торця є у взаємодії з гофрованою гвинтовою заготовкою, а та, в свою чергу, з правої сторони є у взаємодії з притискною калібрувальною шестірнею 14, яка встановлена на шліцах оправки і підтиснута гайкою 15 з можливістю регулювання зазору між калібрувальними конічними шестернями. Причому ширина підтискної конічної калібрувальної шестірні 14 є меншою кроку гвинтової гофрованої заготовки 16. Крім цього, під калібрувальними конічними шестернями 13 і 14 встановлено півкруглий жолоб 17, який є у взаємодії з гвинтовою гофрованою заготовкою 16.

Органи керування процесом навивки, гофроутворення і приводом розміщені на панелі 18, яку встановлено на станині. Пристрій дозволяє здійснювати виготовлення гвинтових гофрованих заготовок 16 декількох типорозмірів, тому оправка 12, калібруючі конічні колеса 13 і 14, гофроформувальні колеса 8 є змінними елементами. Для попередження поломки вузлів і елементів приводу між двигуном і коробкою швидкостей встановлена запобіжна муфта 19.

Особливістю конструкції є те, що механізм гофроутворення в межах формувальних зубчастих коліс на певних ділянках обидві шестерні мають попарно спеціальний профіль – завишений або занижений для утворення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем для змішувальних подрібнюючих та інших операцій, в яких частина впадин між зубами і параметри зубів є змінені в межах зазору між зубами і товщиною заготовки, яка формує гофровану поверхню, а частина зубів є нормальною.

Гофроформувальні колеса 8 механізму гофроутворення виконані у вигляді конічних зубчастих коліс з можливістю регулювання зміни кута їх зачеплення відомим способом. Крім цього, на вході подачі плоскої стрічкової заготовки 7 між двома гофроформувальними колесами 8 з різним профілем гофр на діаметрі шнека, які між собою узгоджуються, встановлено індуктор 20, який охоплює і в разі потреби нагріває плоску стрічкову заготовку, що подається, відомої конструкції з можливістю її відносного переміщення.

Різний профіль зубів і відповідно гофр на одній парі зубчастих коліс виготовляють спеціальними пальцевими, модульними фрезами або спеціальними протяжками. При цьому формувальні колеса для виготовлення гофрованих гвинтових заготовок з різним профілем обертаються з однаковою кількістю обертів.

Робота пристрою для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем здійснюється наступним чином. Плоску заготовку 21 встановлюють в індукторі 20 і між двома гофроформувальними колесами 8, після їх нагрівання і проходження утворюється прямолінійна гофрована стрічка 16, кінець якої встановлюють в щілину між двома калібрувальними конічними шестернями 13 і 14, які прокручуючись калібрують гвинтову гофровану заготовку і подають її в півкруглий жолоб 17, і вона надходить на вихід верстата в тару. Після завершення процесу навивання гофровану заготовку знімають з жолоба. Навивання нової заготовки здійснюється аналогічно до попередньої.

Зусилля необхідне для формування гофр в заготовці, які виконані у вигляді конічних заглиблень з кутом $30...50^\circ$ на глибину $8,0...12\text{мм}$ в кількості штук на один оберт 8.12. Величина зусилля гофроутворення визначається відомими методами в залежності від того в холодно чи на гарячо їх виготовляють. Крім цього гофри мають конусну форму до центра оправки в межах $3...8^\circ$.

Ці форми і розміри наносять на гофроформувальні колеса 8 з можливістю формування відповідних гофр на плоскій заготовці 21 з подальшим їх навиванням на оправку 12, тому параметри калібруючих шестерень 13 і 14 і формувальних роликів 8 повинні бути погоджені.

До переваг верстата для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок з різним профілем гофр належить розширення технологічних можливостей верстата і підвищення продуктивності праці.

В процесі виготовлення різнопрофільних навивних заготовок (НЗ) із складною геометрією рухи робочих органів технологічного обладнання повинні відповідати заданому технологічному процесу формоутворення. Саме тому необхідно визначити співвідношення між характеристичними параметрами згаданого процесу. Зручним об'єктом для параметризації є формоутворюючий інструмент, рухи якого визначаються органами керування верстату та конструктивними особливостями схеми формоутворення.

Для вивчення характеру відносних переміщень введемо такі системи координат (рис. 2):

- UVW - система координат верстату, причому напрямки осей MU , MW , MV збігаються з напрямками відповідно поперечної, поздовжньої та вертикальної подач;

- $OXYZ$ - власна система координат навивної заготовки, причому $OX \parallel MU$, $OY \parallel MV$, $OZ \parallel MW$;

- $C_i X_K Y_K Z_K$ - рухома система координат з початком відліку у точці C_i контакту формуючого елемента інструменту з поверхнею навивної заготовки, а вісь $C_i X_K$ завжди спрямована по дотичній до характеристичної лінії $L-L$ цієї заготовки, вісь $C_i Y_K$ спрямована вздовж нормалі до лінії $L-L$, $C_i Z_K \parallel MW$;

- кут $\psi = \vec{n} \wedge C_i Y_K$ визначає відхилення контактної площини від координатної осі MW , де \vec{n} - нормаль до поверхні F НЗ.

У процесі виготовлення НЗ інструментом, твірна робочої поверхні якого не характеризується певним радіусом кривини (точковий контакт), характер взаємодії інструменту із заготовкою легко відслідковується у випадку подання її геометрії поверхонь у параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} x &= [r_o(t, \chi_o) + r_1(t, \chi_1) \cos(\alpha_o + \alpha_p + (t/b)(dv/dt)) + r_2(t, \chi_2) \sin(\alpha_o + \\ &+ \alpha_p + (t/b)(dv/dt))] \cos(v_o + t dv/dt); \\ y &= [r_o(t, \chi_o) + r_1(t, \chi_1) \cos(\alpha_o + \alpha_p + (t/b)(dv/dt)) + \\ &+ r_2(t, \chi_2) \sin(\alpha_o + \alpha_p + (t/b)(dv/dt))] \sin(t dv/dt + v_o); \\ z &= z_o + r_1(t, \chi_1) \sin(\alpha_o + \alpha_p + (t/b)(dv/dt)) - r_2(t, \chi_2) \cos(\alpha_o + \\ &+ \alpha_p + (t/b)(dv/dt)) + \hat{C}(t dv/dt + \alpha_o), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\vec{r}_o(t, \chi_o)$, $\vec{r}_1(t, \chi_1)$, $\vec{r}_2(t, \chi_2)$ - функціональні радіус-вектори;

$b = (dv/dt)/(d\alpha/dt)$;

χ_i - незалежна змінна відповідного i -го функціонального радіус-вектора;

α_p - кутова характеристика профілю;

$dv/dt, d\alpha/dt$ - кутові швидкості обертання відповідно площини N (радіус-вектора $\vec{r}_o(t, \chi_o)$) та радіус-вектора $\vec{r}_1(t, \chi_1)$;

\hat{C} - параметр кроку гвинтової лінії: $\hat{C} = T/2\pi$.

У випадках, коли формоутворюючий інструмент має складну форму, задача значно ускладнюється.

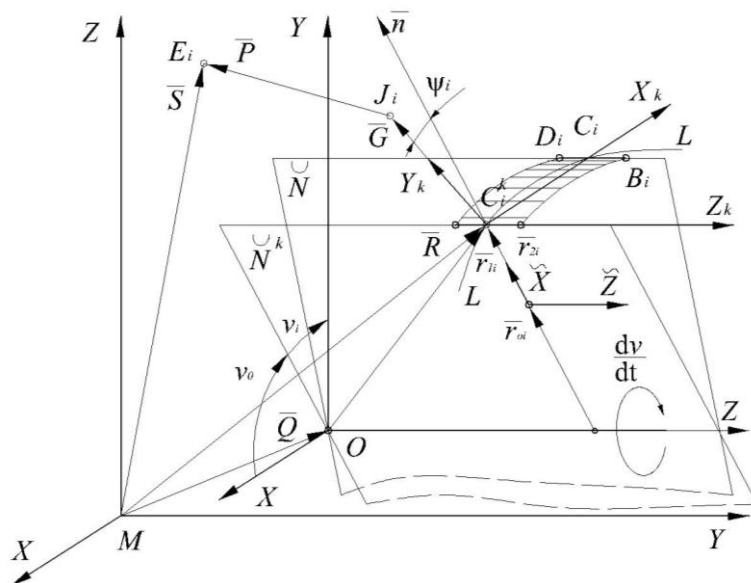


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення координат розміщення виконавчих органів верстату і точки контакту інструменту з поверхнею навивної заготовки в процесі її формоутворення

Припустимо, що рух точки E здійснюється відповідно до переміщень, які задаються керуючими механізмами верстату. Оскільки задача керування верстатом зводиться до координації рухів окремих ланок його механізмів для реалізації необхідного процесу формоутворення, то вирішення забезпечується введеною параметризацією. Для цього достатньо виявити між координатами точок E і C взаємопов'язані співвідношення, тобто виявити вид функціональної залежності, яка переводить довільну точку C у співпадання з іншою відповідною точкою E . Ця задача зводиться до вивчення групи твердих переміщень в рімановому просторі. Розглянемо, зокрема, безперервні групи переміщень для випадку виготовлення НЗ методом навивання для величини калібру співвідносного з шириною спіралі, а також оброблення НЗ різанням. Для спрощення розрахунків прийmemo: $\alpha'_i = 0$; $\chi_i = 0$, $i = 1, 3$; $z_o = 0$; $\alpha_p = 0$; $b = 1$.

Групи перетворень твердих переміщень визначаються з таких умов:

1. Будь-який вектор, нормальний до траєкторії $\sum C$, є інваріантом загального переміщення групи g , які зберігають нерухомими точки E .

2. Якщо відомий рімановий простір розмірністю $m + f$ перетворений групою переміщень, траєкторії яких мають розмірність m , то завжди можна вибрати систему координат x^1, x^2, \dots, x^m ; U^1, U^2, \dots, U^m так, щоб m перших координат перетворювались транзитивно між собою, а f наступних залишились інваріантними.

З врахуванням цих умов виконано геометричну побудову схеми рухів системи для знаходження груп перетворень, які пов'язані з заданим технологічним процесом і керуванням верстатом (рис. 1). Виходячи із такої побудови:

$$\vec{S}(E) = \vec{P} + \vec{G} + \vec{R} = \vec{P} + \vec{G} + \vec{Q} + \vec{R}_c, \quad (2)$$

де $\vec{Q} = U_Q \vec{i} + W_Q \vec{j} + V_Q \vec{k}$; $\vec{R} = U_C^K \vec{i} + W_C^K \vec{j} + V_C^K \vec{k}$; $\vec{S}(E) = U \vec{i} + W \vec{j} + V \vec{k}$;

$\vec{P} = U_p \vec{i} + W_p \vec{j} + V_p \vec{k}$; $\vec{R}_c = (\Delta_1 x_c + \Delta_2 x) \vec{i} + (-\Delta_2 x + \Delta_1 x) \vec{j} + z_c^* \vec{k}$,

де $\Delta_1 = \cos[\arctg(y/x) - \arctg(y_o/x_o)] = \cos(v'_t t)$;

$\Delta_2 = \sin[\arctg(y/x) - \arctg(y_o/x_o)] = \sin(v'_t t)$.

Згідно умови (2) припустимо, що $\vec{G} \perp MW$, тоді вектор \vec{G} подамо у вигляді:

$$\vec{G} = \rho_i \vec{n}_w = \rho_i \left(\frac{\text{grad } F(C_i)}{|\text{grad } F(C_i)|} \right)_{W=\cos t} = \rho_i \left(-\frac{V'_{ot} \vec{i}}{\sqrt{U'^2_{ot} + V'^2_{ot}}} + \frac{\vec{k}}{\sqrt{1 + V'^2_{ot}/U'^2_{ot}}} \right), \quad (3)$$

де ρ_i - характеристичний параметр інструменту;

\vec{n}_w - одиничний вектор, $\vec{n}_w \perp MW$.

Похідні по часу від відповідних координат у точці контакту з інструментом визначаються із матричного перетворення:

$$\begin{pmatrix} U'_{ot} \\ V'_{ot} \\ W'_{ot} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U'_t \\ V'_t \\ W'_t \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_1 & \Delta_2 & 0 & 0 \\ -\Delta_2 & \Delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Одиничний вектор \vec{n}_w вважається додатним, якщо, дивлячись із початку координат, спостерігач бачить, що при обході поверхні деталі зліва направо інструмент залишається з лівого боку відносно поверхні і - від'ємним, якщо з правого.

Величина характеристичного параметра інструменту ρ_i визначається розміщенням формоутворюючого інструменту у рухомій системі координат за умови дотику контактної площини до оброблюваної поверхні. Однак, в процесі формоутворення розташування інструменту відносно рухомої системи координат змінюється в процесі відносного переміщення характеристичної лінії $L-L$ [94], це дає підстави стверджувати, що $\rho_i = \rho_i(\xi)$. Ця умова особливо актуальна у випадках формоутворення поверхонь операціями різання та зміцнення.

Згідно побудови напрямок вектора \vec{G} збігається з віссю $C_i Y_K$, а його значення у тій же системі координат слід визначати як функцію $Y_K = \rho_i(\xi)$, значення якої залежить від розташування формоутворюючого інструменту.

Проектуючи векторну рівність (2) на осі координат верстату, отримаємо:

$$\begin{aligned} U &= U_C^K \pm \left(U_P + \rho_i(\xi) V_i' / \sqrt{U_i'^2 + V_i'^2} \right); \\ W &= W_C^K + W_P; \\ V &= V_C^K \pm \left(V_P + \rho_i(\xi) / \sqrt{1 + (V_i'/U_i')^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де U, W, V - координати точки E , яка визначає розміщення виконавчих органів верстату;

$\rho_i(\xi)$, $V_i' / \sqrt{U_i'^2 + V_i'^2}$ - функції кутів нахилу контактної площини формоутворюючого інструменту;

(U_P, W_P, V_P) - координати вектора \vec{P}_E , величина якого визначається конструктивними особливостями технологічного устаткування. У багатьох випадках визначення його величини пов'язане зі значними труднощами, тому можна прийняти, що $U_P = W_P = V_P = 0$.

У рівнянні (4) верхні знаки -, "+", використовуються при додатному значенні одиничного вектора, "-" при від'ємному.

Аналіз запропонованих рівнянь (5) показує, що існують поверхні, в процесі формоутворення яких не забезпечується змінний кут нахилу контактної площини. Для забезпечення цього зв'язку необхідно переміщувати формоутворюючий інструмент, розглядаючи його у просторі як жорстко пов'язаний з рухомою системою координат $CX_K Y_K Z_K$ і як рухоме тіло відносно цієї системи. В результаті такого підходу зв'язок між робочими переміщеннями виразимо у вигляді рівнянь в переміщеннях:

$$\begin{aligned} \Delta U_E &= \left[1 - \frac{\rho_i(\xi) \varepsilon_{1i}}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} + \frac{\rho_i(\xi) \xi_i' \varepsilon_2}{x_i' (1 + \varepsilon_2^2)^{1/2}} \right]; \\ \Delta W_E &= \rho_i(\xi) \xi_i' \operatorname{ctg} \xi \Delta U_C^K; \\ \Delta V_E &= \left[\varepsilon_2 - \frac{\rho_i(\xi) \varepsilon_{1i} \varepsilon_2}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} - \frac{\rho_i(\xi) \xi_i'}{x_i' (1 + \varepsilon_2^2)^{1/2}} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

де $\varepsilon_1 = \left| \frac{U_i'}{U_i''} \quad \frac{V_i'}{V_i''} \right| / (U_i')^3$; $\varepsilon_2 = V_i' / U_i'$;

$\Delta U_E, \Delta W_E, \Delta V_E$ - величини переміщень виконавчих органів верстату;

$\varepsilon_{1i} / (1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}$ - кривина координатної лінії оброблюваної поверхні ГЗ.

В процесі формоутворення поверхонь НЗ в багатьох випадках має місце умова: $\psi = \psi(t)$.

Тоді у рівнянні (2) вектор $\vec{G} = \vec{G}(\psi, C)$. Причому

$$\vec{G}(\psi, C) = \rho \zeta(\psi) \left(\frac{\overline{\operatorname{grad} F(C)}}{|\overline{\operatorname{grad} F(C)}|} \right)_{W=\cos t}, \quad (7)$$

де $\zeta(\psi)$ - матриця Верзора: $\zeta(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$.

Підставивши вираз (6) у рівняння (2) та спроектувавши його на осі координат, отримаємо:

$$\begin{aligned} \tilde{U} &= U_C^K \pm \left(U_P + \rho_i(\theta) V_i' / \sqrt{U_i'^2 + V_i'^2} \right); \\ W &= W_C^K + \left(W_P + \rho_i(\theta) \sin \psi / \sqrt{1 + (V_i'/U_i')^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$V = V_C^K \pm \left(V_p + \rho_i(\theta) \cos \psi / \sqrt{1 + (V'_i/U'_i)^2} \right) .$$

Розкладемо вираз (2), підставивши в нього залежність (5) у ряд Тейлора в околі довільної точки E_o в момент часу t_o :

$$\bar{S}(E) = \bar{S}(E_o) + \bar{S}'(E_o) + \bar{S}''(E_o) / 2 + \dots , \quad (9)$$

де E_o - початкове положення точки E .

Обмежившись величиною малості другого порядку у формулі (8), слід відзначити, що закон переходу із будь-якого кінематичного стану верстату у сусідній в першому наближенні можна завжди характеризувати криволінійним переміщенням точки E по дотичній до траєкторії еквідистантної кривої, визначеній в околі цієї точки. Тоді вектор абсолютного переміщення точки E : $d\bar{S} = \Delta\bar{S}(E) = \bar{S}(E) - \bar{S}(E_o)$. Диференціюючи вираз (7), отримаємо:

$$d\bar{S} = d\bar{R}_{C_i} + d\bar{P}_i + \rho \zeta'(\psi) d \left(\frac{\overline{\text{grad}} F(C_i)}{|\text{grad} F(C_i)|} \right)_{W=\text{const}} + \rho \left(\frac{\overline{\text{grad}} F(C_i)}{|\text{grad} F(C_i)|} \right)_{W=\text{const}} d\zeta'(\psi) . \quad (10)$$

Прийнявши, що $\bar{P} = 0$, а останній член цього виразу суттєво не впливає на кінематику розглядуваного процесу, процес формоутворення здійснюється поєднанням декількох елементарних рухів. Розглядаючи одні з них як переносні, а інші як відносні, можна реалізувати їх взаємодією кінематичних ланцюгів механізмів верстату, які визначатимуть переміщення інструменту відповідно з обертанням оправы.

Отже, взаємозалежні рухи кінематичних ланцюгів визначимо із проекцій векторів рівняння (10) на координатні вісі:

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{U}_E &= \left(1 - \frac{\rho_i(\xi) \varepsilon_1 (1 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_2)}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \right) \Delta U - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \rho_i(\xi) (1 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_2)}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \Delta W ; \\ \Delta\tilde{W}_E &= \left(1 - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \rho_i(\xi) \sin \psi}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \right) \Delta W + \frac{\rho_i(\xi) \varepsilon_1 \sin \psi}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \Delta U ; \\ \Delta\tilde{V}_E &= \left(\frac{V'_i}{W'_i} - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \rho_i(\xi) \cos \psi}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \right) \Delta W + \left(\varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3 \rho_i(\xi) \cos \psi}{(1 + \varepsilon_2^2)^{3/2}} \right) \Delta U , \end{aligned} \quad (11)$$

де $\Delta\psi = d\psi$;

$\varepsilon_3 = x'_i / y'_i$.

Таким чином, абсолютна криволінійна траєкторія руху виконавчих органів верстату описується залежністю:

$$S_{TP} = \sum_{i=1}^{\lambda} d\tilde{U}_i, d\tilde{W}_i, d\tilde{V}_i, d\psi_i , \quad (12)$$

де λ - кількість опорних точок характеристичної лінії контура поверхні навивної заготовки.

У випадку дослідження процесів формоутворення НЗ, ширина стрічки яких змінюється за відомою залежністю $B = B(t)$, можна розглядати рівняння оправы як диференціал функції, а параметр інструменту $\rho_i = \rho_i(\xi) + B(t)$.

Висновки.

Таким чином, запропонований метод розрахунку дає можливість:

- визначити послідовність злагоджених переміщень ланок виконавчих механізмів, які забезпечують реалізацію заданих питань вихідного технологічного завдання;
- розрахувати траєкторію руху формоутворюючого інструменту і підготувати необхідну документацію;

- використовувати отримані формули для розрахунку і проектування необхідного технологічного устаткування та формоутворюючого інструменту;
- в процесі проектування нового обладнання правильно вибрати кінематику виконавчих органів верстату;
- здійснювати попередні дослідження вказаних процесів в режимі аналітичного 3D-моделювання.

Список використаної літератури.

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка/М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
2. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки/Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1980. – 348 с.
3. Лысовой М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки/М.И. Лысовой. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
4. Шевченко К.Н. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением/К.Н. Шевченко. – М.: Вища школа, 1970. – 351 с.
5. Гевко Б.М. Технологічне виготовлення спіралевих шнеків/Б.М. Гевко. – Л.: Світ, 1986. – 125 с.
6. Романовський В.П. Справочник походной штамповки/В.П. Романовський. – М.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
7. Пилипець М.І. Дослідження процесу навивання ребристих профілів / М.І. Пилипець. – Л.: Машинознавство, 1998. – № 9-10. – С.36-38.
8. Аверкиев Ю.А. Характер формоизменения и силовые условия при гибке полосы на ребро / Ю.А. Аверкиев. – Вестник машиностроения, 1981. – №1. – С. 64-66.
9. Васильків В.В. Технологічне спорядження для виготовлення навивних заготовок/В.В. Васильків // Збірник наукових праць. – Луцьк: Наукові нотатки. – Вип.10. – С. 59-64.
10. Теория шнековых устройств/И.Э. Груздев и др. – Л., 1987.
11. Мошнин Е.Н. Гибка и прокатка на пресах/Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1959. – 360 с.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2018