

УДК 621.81.001.66(075.8)

Васильків В. В.

**МЕТОДИКА ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ І ШНЕКОВИХ ЗАГОТОВОК**

Деталі машин типу шнеків набувають усе більшого використання у різних галузях промислового виробництва. Підтвердженням цього є помітна тенденція до зростання обсягу та номенклатури таких деталей. Їх використовують в якості: робочих органів гвинтових змішувачів, подрібнювачів, грануляторів, сепараторів, шнекових транспортерів та гвинтових спусків, гвинтових протяжок, різців, гвинтових елементів пилоочисних пристроїв (циклонів), ребристих труб теплообмінних апаратів, витих (стрічкових) магнітопроводів, гвинтових паль, анкерів, бурів тощо.

Близько десяти років тому назад професором Гевком Б. М. було введено поняття гвинтової заготовки (ГЗ), а професором Пилипцем М. І. поняття навивної заготовки [1]. Це дозволило розширити сферу використання результатів досліджень. Крім деталей типу шнеків було охоплено ширше коло деталей машин циліндричної та профільної форми, які можна виготовляти з ГЗ. Зокрема це навивні деталі типу тіл обертання: фланці, пружинні шайби, поршневі кільця, тарілчасті пружини, втулки, зубчасті колеса, гайки тощо.

Питанням розробки та дослідженням таких технологій присвячені праці А. З. Журавльова, В. А. Єгорова, А. Е. Церни, С. Е. Рокотяна, В. Е. Гурвіча, Д. Я. Шифріна, С. Ф. Пилипаки, В. С. Медведєва, Б. М. Гевка, М. І. Пилипця, Р. М. Рогатинського та ін. [2].

Найчастіше одержання ГЗ здійснюють з листового і сортового прокату різними технологічними способами вальцювання, навивання, формовки, скручування тощо. Економічно доцільним є реалізація таких операцій на металорізальному (наприклад, навивання на токарних верстатах) та спеціальному (наприклад, вальцювання на ротаційних штампах) обладнанні.

Зважаючи на різноманітність технологічних методів та на значний об'єм розробок виявлено ряд проблемних питань. Зокрема велика кількість технологічних способів ускладнює вибір раціональних технічних рішень. Позаяк в процесі проектування технологій виготовлення ГЗ і ШЗ має місце вплив суб'єктивних факторів, що проявляються у виборі раціональних технічних рішень, оскільки не існує чіткої методики їх вибору. При однакових виробничих умовах і програмі технологічні процеси часто відрізняються один від одного, і поставлені задачі оцінюються по-різному залежно від сталих прийомів і досвіду технічного персоналу. До того ж методи виготовлення різноманітні і залежать не тільки від вищевказаних, але і від багатьох інших факторів. Усі ці обставини і створюють труднощі та складність розробки технологічних процесів (ТП) виготовлення гвинтових деталей, що вимагають великої витрати часу.

Для системного дослідження технологій виготовлення деталей типу шнеків раніше було введено поняття шнекової заготовки (ШЗ), яка буває цільною, або комбінованою, коли спіральні неперервні або секторні ГЗ закріплені на опорному елементі, наприклад валу.

Метою роботи є підвищення обґрунтованості проектних рішень в процесі виробництва гвинтових і шнекових заготовок на основі створеної економіко-математична моделі вибору ефективних технологічних процесів їх виготовлення з урахуванням технологічних можливостей конкретного виробництва.

В результаті системного аналізу технологій виготовлення різноманітних деталей типу шнеків було розроблено узагальнений технологічний маршрут виготовлення ГЗ і ШЗ, а також бази даних конструкцій таких заготовок та технологічних операцій їх виготовлення [2]. Кожна з конструкцій та технологічних операцій характеризується рядом показників, які описують технологічність ГЗ і ШЗ [3]:

- параметри, які характеризують просторову геометричну форму витків, наприклад, коефіцієнт нерівномірності витягування стрічки  $\psi$ , коефіцієнт кроку витка  $K_r$  тощо;

- параметри, які характеризують профіль поперечного перерізу гвинтової спіралі, наприклад, коефіцієнт питомої висоти  $b$ , коефіцієнт товщини зовнішньої крайки витка  $h_H$  тощо;
- параметри, які характеризують геометричну форму початкових заготовок, які використовуються для виготовлення ГЗ і ШЗ, наприклад, питома висота початкової смугової заготовки  $b_z$ , відносний радіус кривини розгортки витка  $r_v$  тощо;
- параметри, які характеризують технологічні властивості матеріалу спіралі, наприклад, комплексний показник пластичності Гурвіча  $F_m$ , відносне видовження матеріалу  $\delta_s$  тощо;
- параметри, які характеризують технологію виготовлення ГЗ і ШЗ, наприклад, відносний радіус згину початкової заготовки  $r'$ , коефіцієнт технологічної складності виготовлення навивних заготовок  $K_{mc}$ , коефіцієнт використання матеріалу  $K_{B.M.}$  тощо;
- параметри, які характеризують економічність виробництва, наприклад, коефіцієнт уніфікації ТП  $K_{v.тп}$ , коефіцієнт  $t_g$  потужності технологічного маршруту за показниками якості тощо.

У структурі технологічного маршруту виготовлення ГЗ і ШЗ, який складається  $\tau$ -ої кількості операцій можна виділити  $\tau - 1$ -ову кількість операцій (операції № 1–№  $(\tau - 1)$ ), які забезпечують одержання проміжної заготовки (неперервно-секційна, кільцева секторна заготовки [1, 2] тощо), з якої одержуватимуть ГЗ або ШЗ та окремо операцію №  $\tau$  власне утворення згаданих заготовок. Реалізацію останньої операції можна здійснювати різною кількістю технологічних способів.

Для системного розгляду характеристик таких операцій нижче використовуватимемо такі позначення:  $f$  – порядковий номер операції технологічного маршруту,  $f = \overline{1, \tau - 1}$ ,  $i$  – порядковий номер варіанта технологічного способу реалізації операції №  $\tau$ . Індексом  $f$  та  $i$  позначатимемо значення певного показника відповідно для  $f$ -ої операції технологічного маршруту та  $i$ -ого способу операції №  $\tau$  утворення ГЗ або ШЗ.

Залежно від різних виробничих умов для виготовлення однієї і тієї ж ГЗ або ШЗ можна використовувати різні операції та відповідно і різні типи обладнання, яке відрізняється за конструктивними особливостями (горизонтальні, вертикальні установки і т. д.), видом обробки (верстати різної групи), ступенем автоматизації, універсальністю, точністю, типорозмірами, видом використовуваного спорядження, вартістю, кількістю необхідних працівників тощо.

Відтак ГЗ і ШЗ можна виготовити з використанням декількох варіантів обладнання, сумарна кількість  $Q_\Sigma$  якого визначається за формулою:

$$Q_\Sigma = Q Q_M = \prod_{f=1}^{\tau-1} \tilde{q}_f \sum_{i=1}^n q_i, \quad (1)$$

де  $Q$  і  $Q_M$  – загальні кількості варіантів обладнання відповідно на операціях № 1–№  $(\tau - 1)$  та на кінцевій операції №  $\tau$ ;

$\tilde{q}_f$  і  $q_i$  – кількості варіантів обладнання;

$n$  – кількість варіантів технологічних способів, які забезпечують утворення ГЗ або ШЗ.

Критерій технічно-економічної ефективності технологічної операції виготовлення згаданих заготовок для даної програми випуску можна визначити за формулою:

$$F = \alpha_1 m + \alpha_2 \tilde{Z} + \frac{\alpha_3 T_0}{V_{ГЗ}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $m$  – приведена матеріаломісткість заготовки одиничного об'єму;

$\tilde{Z}$  – приведені витрати на виготовлення заготовки одиничного об'єму;

$T_0$  – основний час виготовлення заготовки одиничної довжини;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коефіцієнти вагомості кожної з складових (приймають за вартістю матеріалу, загальних витрат енергії, машино- і людино-годин праці та особливостей ТП, згідно з методом експертних оцінок);

$V_{ГЗ}$  – об'єм тіла витків ГЗ.

Приведена матеріаломісткість заготовки визначається за залежністю:

$$m = \pi \rho \frac{D^2 - d^2}{4} \frac{V_{заг}}{V_{ГЗ}}, \quad (3)$$

де  $V_{заг}$  – об'єм початкової заготовки, яку використовують для виготовлення ГЗ,

$\rho$  – густина матеріалу заготовки,

$D$  та  $d$  – діаметри зовнішньої та внутрішньої крайок витка.

У випадку, якщо виготовлення ГЗ здійснюють із прямолінійних смугових заготовок, то в наведених формулах (1) і (2) параметри об'єму тіла витків можна замінити на параметри лінійної довжини  $L_{заг}$  смуги (стрічки) та довжини  $L_{ГЗ}$  тіла витків.

Основний час, який необхідно затратити на виготовлення ГЗ одиничного об'єму визначають за показником часу деформації:

$$\frac{T_0}{V_{ГЗ}} = \frac{(V_{заг} - \Delta V)}{v_{заг} V_{ГЗ}}, \quad (4)$$

де  $\Delta V$  – об'єм технологічних відходів (прикладом є кінцеві відходи стрічкової заготовки, тобто об'єм заготовки, який витрачається на защемлення кінця, недовигин заготовки для операції навивання);

$v_{заг}$  – швидкість проходження заготовки крізь зону деформації.

При виготовленні вальцьованих ГЗ зі стрічкових заготовок:

$$\frac{T_0}{L_{ГЗ}} = \frac{(L_{заг} - \Delta L_B)}{v_{Взаг} L_{ГЗ} (1 + S_h)}, \quad (5)$$

де  $S_h$  – випередження в особливому шарі,

$v_{Взаг}$  – колова швидкість циліндричного робочого валка, який вальцює згаданий шар;

$\Delta L_B$  – лінійна довжина технологічних відходів:

$$\Delta L_B = 2\delta_k + L_{заг} k, \quad (6)$$

де  $\delta_k$  – кінцеві відходи на обрізання кінців стрічки:  $\delta_k = 20\text{--}30$  мм. На два кінця відхід складає  $2\delta_k = 40\text{--}60$  мм;

$k$  – коефіцієнт, який враховує угар матеріалу. Для смугової сталі він складає 5–6 %, тобто  $k = 0,05\text{--}0,06$ .

При виготовленні навивних ГЗ:

$$\frac{T_0}{L_{ГЗ}} = \frac{(L_{заг} - \Delta L_H)}{0,5wL_{ГЗ}\sqrt{dD}}, \quad (7)$$

де  $w$  – кутова швидкість обертання оправи;

$\Delta L_H = \delta_1 + \delta_2$ ,  $\delta_1$  і  $\delta_2$  – відходи відповідно на защемлення кінця і недовигин смугової заготовки.

У загальному випадку приведені витрати  $\tilde{Z}$  для даної програми випуску ГЗ і ШЗ враховують капітальні вкладення за різними варіантами обладнання технологічних операцій, собівартість заготовок, отриманих із використанням порівнювальних варіантів обладнання та нормативний коефіцієнт ефективності:

$$\tilde{Z} = Z_n + E_n K, \quad (8)$$

де  $Z_n$  та  $K$  – відповідно поточні витрати та капітальні вкладення за кожним варіантом;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Капітальні вкладення за різними варіантами обладнання, які можна використовувати для виготовлення ГЗ і ШЗ для заданої програми випуску:

$$K_i = K_{об_i} + K_{прим_i} + K_{спор_i}, \quad K_f = K_{об_f} + K_{прим_f} + K_{спор_f}, \quad (9)$$

де  $K_{об_i}$  та  $K_{об_f}$  – балансові вартості обладнання, які можуть використовуватись у ТП;

$K_{прим_i}$  та  $K_{прим_f}$  – вартості приміщення у якому розміщене обладнання;

$K_{спор_i}$  та  $K_{спор_f}$  – вартості технологічного спорядження.

Поточні витрати за різними варіантами обладнання для заданої річної програми випуску:

$$Z_{nf} = Z_{зарпл_f} + Z_{ам_f} + Z_{рем_f} + Z_{ел_f} + Z_{спор_f} + Z_{інстр_f} + Z_{прим_f}, \quad (10)$$

$$Z_{ni} = Z_{зарпл_i} + Z_{ам_i} + Z_{рем_i} + Z_{ел_i} + Z_{спор_i} + Z_{інстр_i} + Z_{прим_i},$$

де  $Z_{зарпл_i}$  та  $Z_{зарпл_f}$  – зарплата основних і допоміжних робочих (з відрахуваннями), які залучені на відповідних операціях ТП;

$Z_{ам_i}$  та  $Z_{ам_f}$  – амортизаційні відрахування на обладнання;

$Z_{рем_i}$  та  $Z_{рем_f}$  – витрати на ремонт обладнання;

$Z_{ел_i}$  та  $Z_{ел_f}$  – витрати на електроенергію;

$Z_{спор_i}$  та  $Z_{спор_f}$  – витрати, спричинені використанням технологічного спорядження;

$Z_{інстр_i}$  та  $Z_{інстр_f}$  – витрати спричинені використанням інструментів (різців, бойків);

$Z_{прим_i}$  та  $Z_{прим_f}$  – витрати на утримання приміщення, у якому реалізують відповідну операцію.

Приведені витрати на виготовлення розглядуваних заготовок одиничної довжини з використанням  $\tau$ -ої кількості технологічних операцій для  $j_i$  і  $j_f$  варіантів обладнання визначаються так:

$$\begin{aligned} \tilde{Z} = \frac{1}{N_o V_{ГЗ}} & \left[ Z_{зарпл_i j_i} + Z_{ам_i j_i} + Z_{рем_i j_i} + Z_{ел_i j_i} + Z_{спор_i j_i} + Z_{інстр_i j_i} + Z_{прим_i j_i} + E_n (K_{об_i j_i} + K_{прим_i j_i} + K_{спор_i j_i}) + \right. \\ & \left. + \sum_{j_f=1}^{\tau-1} \left( Z_{зарпл_f j_f} + Z_{ам_f j_f} + Z_{рем_f j_f} + Z_{ел_f j_f} + Z_{спор_f j_f} + Z_{інстр_f j_f} + Z_{прим_f j_f} + \right) \right] \quad (11) \\ & \left. + E_n (K_{об_f j_f} + K_{прим_f j_f} + K_{спор_f j_f}) \right] \end{aligned}$$

де  $N_o$  – річна програма випуску ГЗ або ШЗ;

$j_i$  та  $j_f$  – індекси відповідних варіантів обладнання.

За формулою (11) здійснюють розрахунок ряду значень приведених витрат для різних технологічних способів реалізації операції №  $\tau$  та відповідних різних варіантів обладнання для реалізації таких способів, а також варіантів обладнання для реалізації технологічних операцій № 1–№  $(\tau - 1)$  вибраного технологічного маршруту.

У випадку малих значень  $\alpha_1$  і  $\alpha_3$  у порівнянні з  $\alpha_2$  в (2) основним критерієм вибору операцій виготовлення ГЗ і ШЗ є вираз (11). У цьому випадку на основі такої формули розраховують приведені витрати для різних варіантів і порівнюють їх між собою.

В умовах сучасного виробництва доцільне не придбання нового обладнання, а дозавантаження уже існуючого. Відтак вибір варіанта економічно ефективної технологічної операції необхідно здійснити з урахуванням наявного на підприємстві обладнання або можливостей купівлі нового обладнання та технологічного спорядження. Таким актуальним завданням є вибір найбільш економічно доцільної операції для заданих виробничих умов.

Так як кожне підприємство має певну номенклатуру технологічного устаткування і не завжди є наявними вільні виробничі площі під нове обладнання, а також засоби для його придбання. Відтак, обмеженням, яке суттєво впливає на вибір варіанта технологічного обладнання є їх пропускна здатність, яку визначають за формулою

$$P_l = C_l F_d, \quad (12)$$

де  $C_l$  – кількість одиниць обладнання одного типу;  
 $F_d$  – дійсний річний фонд часу роботи одиниці обладнання:

$$F_d = \tilde{D}Sq(1 - 0,01\beta), \quad (13)$$

де  $\beta$  – планові витрати часу в роботі обладнання у зв'язку із ремонтом, (%) (для механічного обладнання  $\beta = 3-5\%$ );

$\tilde{D}$  – кількість робочих днів в плановому періоді;

$q$  – середня тривалість зміни;

$S$  – змінність роботи обладнання.

Варіант обладнання вибирається за умови вирішення системи нерівностей:

$$\sum_{i_1=1}^{z_1} B_{i_1} t_{u.k i_1} \leq P_1, \dots, \sum_{i_l=1}^{z_l} B_{i_l} t_{u.k i_l} \leq P_l, \quad (14)$$

де  $t_{u.k i_l}$  – норма штучного часу на виготовлення ГЗ або ШЗ із застосуванням  $l$ -го типу обладнання;

$1, 2, \dots, l$  – індекси типів обладнання, які можуть використовуватись у виробництві;

$z_1, z_2, \dots, z_k$  – кількість технологічних способів впливу на заготовку на обладнанні даного типу;

$B_{i_1}, \dots, B_{i_l}$  – коефіцієнти, які враховують спосіб виготовлення заготовки;

$P_1, P_2, \dots, P_l$  – пропускна здатність обладнання одного типу, яке може використовуватись при виготовленні таких заготовок.

Обмеження, які суттєво впливають на вибір варіанту технологічної операції є такими:

$$\begin{aligned} \psi_{\min i}^* \leq \psi \leq \psi_{\max i}^*, \quad K_{T \min i}^* \leq K_T \leq K_{T \max i}^*, \dots, b_{\min i}^* \leq b \leq b_{\max i}^*, h_{H \min i}^* \leq h_H \leq h_{H \max i}^*, \dots \\ b_{z \min i}^* \leq b_z \leq b_{z \max i}^*, r_{v \min i}^* \leq r_v \leq r_{v \max i}^*, \dots, \delta_{5 \min i}^* \leq \delta_5 \leq \delta_{5 \max i}^*, F_{m \min i}^* \leq F_m \leq F_{m \max i}^*, \dots \\ r'_{\min i}^* \leq r' \leq r'_{\max i}^*, K_{mc \min i}^* \leq K_{mc} \leq K_{mc \max i}^*, K_{B.M. \min i}^* \leq K_{B.M.} \leq K_{B.M. \max i}^*, \dots, \\ K_{y.TII \min i}^* \leq K_{y.TII} \leq K_{y.TII \max i}^*, t_{g \min i}^* \leq t_g \leq t_{g \max i}^*, \dots \end{aligned} \quad (15)$$

де для  $i$ -ого технологічного способу символом «\*» позначено граничні значення відповідних конструктивно-технологічних показників ГЗ і ШЗ згідно [3], які вибирають з бази даних.

Наприклад, коефіцієнт кроку витка для операцій вальцювання  $K_{T \min i}^* = 0,8-0,95$  так як отримання ГЗ із меншим значенням  $K_T$  від допустимого ускладнене із технологічних причин (із-за конструкції стану, робочих валків і т. д.). Фактично цей коефіцієнт є показником розтягування на крок плоского витка до утворення крокової ГЗ. Для технологічних операцій формування і вальцювання, які забезпечують одержання цільних ГЗ  $K_{T \max i}^* = 1,2$ . Перевищення цього значення призводить до значного відхилення твірної гелікоїдної поверхні від перпендикуляра до осі спіралі і спричинює ефект «завалу витка». У випадку використання різних технологічних операцій виготовлення неперервно-секційних ГЗ і неперервно-секторних заготовок  $K_{T \max i}^* = 2,2$  [2]. Операція вальцювання кільцевих секторних заготовок забезпечує одержання ГЗ із  $K_{T \max i}^* = 1,8$ .

Таким чином вирази (2)–(7), (11), (14) і (15) являють собою економіко-математичну модель, яка дозволяє здійснити вибір найбільш економічно-доцільного варіанту ТП з урахуванням матеріаломісткості, часу виготовлення ГЗ і ШЗ, варіанта обладнання та умов реалізації різних способів утворення таких заготовок.

На основі такої моделі розроблено методику вибору ефективних технологічних процесів. План реалізації такої методики такий:

1. Вибір технологічного маршруту із бази даних.
2. Вибір варіантів технологічних способів реалізації операції виготовлення гвинтових заготовок і шнекових заготовок.
3. Розрахунок показників технологічності гвинтових заготовок і шнекових заготовок за вибраними способами.
4. Вибір із бази даних граничних значень показників, які характеризують інтервали реалізації різних способів.
5. Порівняння розрахункових та граничних значень показників технологічності.
6. Визначення варіантів обладнання для реалізації розглядуваних операцій.
7. Розрахунок поточних витрат та значення цільової функції.
8. Перебір варіантів, які найкраще забезпечують реалізацію цільової функції (2).

### ВИСНОВКИ

На основі вперше розробленої економіко-математичної моделі запропоновано методику вибору раціональних технологічних процесів виготовлення гвинтових заготовок і шнекових заготовок з урахуванням технологічних можливостей конкретного виробництва. Вона побудована на визначенні матеріаломісткості і основного часу виготовлення заготовки, а також складових приведених витрат, які необхідно враховувати в процесі порівняння варіантів технологічних операцій. Враховано також показники, що характеризують технологічність заготовок та умови їх доцільною реалізації з баз даних конструкцій та технологічних процесів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Технологічні основи формотворення різнопрофільних гвинтових заготовок [Текст] : монографія / Б. М. Гевко, М. І. Пилипець, В. В. Васильків, Д. Л. Радик. – Тернопіль : Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 457 с.*
2. *Пилипець М. І. Проектування секційних гвинтових заготовок [Текст]: монографія / М. І. Пилипець, В. В. Васильків; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2013. – 179 с.*
3. *Васильків В. Показники технологічності гвинтових заготовок [Текст] / В. Васильків, О. Лясота // *Машинознавство : Науково-технічний і виробничий журнал*, 2010. – № 8. – С. 39–47.*

### REFERENCES

1. *Technological bases forming of multi-profile screw blanks [Text] : monograph / B. Gevko, M. Pylypets, V. Vasylykiv, D. Radik. – Ternopol : Publishing house Ternopol State Ivan Pul'ui Technical University, 2009. – 457 s.*
2. *Pylypets M. Designing sectional screw blanks [Text] : monograph / M. Pylypets, V. Vasylykiv. – Ternopol : Publishing house Ternopil National Ivan Pul'ui Technical University, 2013. – 179 s.*
3. *Vasylykiv V. Indicators manufacturability screw blanks [Text] / V. Vasylykiv, O. Lyasota // *Engineering Science : Scientific-technical and production journal*, 2010. – № 8. – P. 39–47.*

Васильків В. В. – канд. техн. наук, доц. ТНТУ ім. І. Пулюя

ТНТУ ім. І. Пулюя – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль.

E-mail: [Vasylykivv@gmail.com](mailto:Vasylykivv@gmail.com)