

ИЗПОЛЗВАНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКАТА СЕБЕСТОЙНОСТ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА МНОГОПРОХОДНА СТРУГОВА ОБРАБОТКА НА ДЕТАЙЛИ СЪС СЛОЖНА РОТАЦИОННА ФОРМА ВЪРХУ МАШИНИ С ЦПУ

USING OF TECHNICAL COST PRICE TO OPTIMIZE A MULTI-PASSAGE LATHE MACHINING OF PARTS WITH COMPLEX ROTATING FORM ON CNC MACHINES

Тодор Кузманов
ТУ-Габрово

Христо Метев
ТУ-Габрово

Калин Крумов*
ТУ-Габрово

Статията е постъпила на 05 ноември 2014г.; приета за отпечатване на 28 ноември 2014г.

Summary:

Increasing the efficiency of lathe machining parts with complex shapes by CNC machines in a non-stationary cutting, based on an optimization of the many passing processing in probabilistic formulation of the problem and the analysis of different variants of cutting the additive is actual task, solving which is possible with the development of a mathematical model for determining the time of cutting, durability and tool wear, as with many passing processing in non-stationary conditions of cutting, so and with variable cutting during the working stroke of the tool

Key words: model, complex profile surface, non-stationary conditions of cutting, addition, variants of cutting the additive, technologic cost price.

УВОД

За повишаване ефективността на обработването на детайли върху стругови машини с ЦПУ в [4] е изведена зависимост за определяне на технологичната себестойност на еднопроходна операция при обработване с постоянен режим на рязане. Тази зависимост е практически проверена, но използването в качеството на критерий за оптималност при обработване на детайли със сложна форма не е възможно поради причините, изложени в [4]. Следователно трябва да бъде построен универсален модел, в който обстъргването на цилиндрични повърхнини да е негов частен случай. Моделите за всеки отделен случай трябва да се определят, в зависимост от условията на обработване и геометричните характеристики на заготовката и детайла.

При обработване на детайли със сложна форма върху стругови машини с ЦПУ е необходимо да се определи съставящата целева функция, т.е. технологичната себестойност на i -я проход при многопроходната операция и да се състави целевата функция – технологичната себестойност на многопроходната операция при стругане на детайли със сложна форма като цяло.

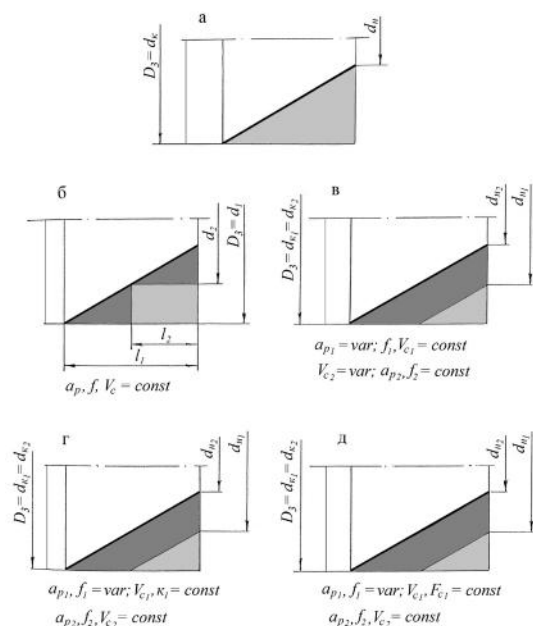
ИЗЛОЖЕНИЕ

- **Определяне на времето на рязане τ_{pi} на i -я проход**

При движение на върха на ножа успоредно на оста на вретеното и постоянен режим на рязане времето се определя по зависимостта

$$\tau_{pi} = \frac{\pi \cdot l_i \cdot d_i}{V_c \cdot f_i} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

където l_i - дължина на обработваната повърхнина на i -я проход (фиг. 1.б), mm; d_i - диаметър на обработваната повърхнина на i -я проход mm; V_c, f_i - скорост рязане (m/min) и подаване за оборот (mm/tr).



Фиг. 1. Варианти за обработване на конусни повърхнини

* Тел.: 0895637468; e-mail: kalin_krasimirov_krumov@abv.bg

При движение на върха на ножа по еквилистанта на обработвания контур на детайла времето е:

$$\tau_{p_i} = \sum_{j=1}^n \tau_{p_{ij}} \quad (2)$$

където $\tau_{p_{ij}}$ – време за рязане при обработване на j -тата елементарна повърхнина на i -я проход, \min ; n – брой елементарни повърхнини обработвани на прохода.

При променлив режим на рязане $\tau_{p_{ij}}$ се определя със зависимостта

$$\tau_{p_{ij}} = \tau_{\kappa_{ij}} - \tau_{\mu_{ij}} \quad (3)$$

където $\tau_{\kappa_{ij}}$ и $\tau_{\mu_{ij}}$ са крайно и начално време за рязане на j -тата елементарна повърхнина на i -я проход

Времето $\tau_{\kappa_{ij}}$ и $\tau_{\mu_{ij}}$ се определят с помощта на зависимости изведени в [1,3], според конкретния вариант на обработване.

При движение на върха на ножа по еквилистанта на обработвания контур на детайла, но с постоянна скорост на рязане V_c , подаването на оборот f и дълбочината на рязане a_p се определят в зависимост от конкретната геометрична конфигурация на обработвания детайл.

• *Определяне на трайността на ножа T_i на i -я проход*

При струговане на детайли със сложна форма и постоянен режим на рязане ($V_c, f, a_p = \text{const}$) трайността на инструмента при прохода може да се определи с помощта на една от известните формули на Тейлър

$$T_i = C_T \cdot a_{pi}^x \cdot f_i^y \cdot V_{ci}^\mu \quad (4)$$

където C_T, x, y, μ са емпирични параметри.

При нестационарен режим на рязане по време на прохода, трайността се определя със зависимостта

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \tau_{p_{ij}}}{\sum_{j=1}^n T_{ij}} \quad (5)$$

където $\tau_{p_{ij}}$ и T_{ij} са време за рязане и трайност на ножа при струговане на j -тата елементарна повърхнина на i -я проход, min ; n – брой елементарни повърхнини обработвани на i -я проход.

Стойностите на T_{ij} се определят по зависимости дадени в [1,2,3], в зависимост от конкретната конфигурация на заготовката, детайла и от режима на рязане.

За определяне на броя поднастройки на ТС МПД b_i за периода на трайност на инструмента при i -я проход, при струговане на детайли със сложна форма, е необходимо да се определи стойността на граничното размерно износване на ножа $[VBr]_i$ и частта от допусковото поле δ_{Ti} , необходима за компенсиране на неточностите от динамичното настройване.

При струговане на детайли със сложна форма и постоянен режим на рязане допустимото размерно изно-

сване на инструмента се определя по зависимостта в [5].

$$[VBr]_i = VBr_0 \left(\frac{L_{p,i}}{1000} + \kappa_u \right) \quad (6)$$

където VBr_0 е относително износване $\mu\text{m}/\text{km}$; $L_{p,i}$ – дължина на пътя на рязане за периода на трайност на инструмента, m ; κ_u – коефициент на начално износване.

Относителното износване се определя с израза

$$VBr_0 = C_u \cdot a_{p,i}^{x_u} \cdot f_i^{y_u} \cdot V_{c,i}^{\mu_u} \quad (7)$$

където C_u, x_u, y_u, μ_u са емпирични параметри, зависещи от условията на рязане; $a_{p,i}, V_{c,i}, f_i$ – елементи на режима на рязане на i -я проход.

$$L_{p,i} = V_{c,i} \cdot T_i \quad (8)$$

където $V_{c,i}$ е скорост на рязане на i -я проход, m/min ; T_i – трайност на ножа на i -я проход, min .

Коефициентът на начално износване κ_u се определя по справочни данни [6].

При струговане на детайли със сложна форма при нестационарен режим на рязане допустимото размерно износване на ножа при i -я проход се определя с израза

$$[VBr]_i = \frac{\sum_{j=1}^n VBr_{ij}}{\sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_{ij}}}{T_{ij}}} + VBr_{0i} \quad (9)$$

където VBr_{ij}, T_{ij} са съответно размерно износване и трайност на ножа при струговане на j -тата елементарна повърхнина на i -я проход; $\tau_{p_{ij}}$ – време на рязане при струговане на j -тата елементарна повърхнина на i -я проход; VBr_{0i} – начално износване на i -я проход.

Големината на размерното износване VBr_{ij} се определя със зависимости дадени в [1,2,3], според конкретните условия на обработването.

Поради малката стойност на началното износване VBr_{0i} в сравнение с граничното износване $[VBr]_i$ [7], тя може да се счита за постоянна при променлив режим на рязане или може да се изчисли по осреднен режим на рязане за проход по справочни данни [6].

При струговане на детайли със сложна форма и постоянен режим на рязане на i -я проход неточността от динамичното настройване $\varepsilon_{HДi}$ се определя със зависимостта [8]

$$\varepsilon_{HДi} = \kappa_v \left\{ \left[a_{p,i} + (\omega_{i-1} + \omega_i) / 2 \right]^x - \left[a_{p,i} - (\omega_{i-1} + \omega_i) / 2 \right]^x \right\} f_i^{y_v} \cdot V_c^{\mu_v} \quad (10)$$

където κ_v, x_v, μ_v са емпирични параметри; ω_i – част от допусковото поле на размера, получаващ се след прохода.

$$\omega_i = T_{pi} - \varepsilon_{изм_i} - \varepsilon_{nc_i} \quad (11)$$

където T_{pi} е допуск на размера от технологическата база; ε_{nc_i} и $\varepsilon_{изм_i}$ – част от допусковото поле, компенсират постоянните систематични грешки и грешките от измерване на i -я проход.

При променлив режим на рязане по време на i -я проход

$$\varepsilon_{нд_i} = \max[\varepsilon_{нд_i}] \quad (12)$$

където $Y = \max[Y]$, означава, че величината Y е равна на максималната стойност на функцията Y в областта на изменението \square .

В случаят съществува функция за $\varepsilon_{нд_i}$ от променливите $a_{p,i}$, $V_{c,i}$, f_i във вида

$$\varepsilon_{нд_i} = \varepsilon_{нд_i}(a_{p,i}, V_{c,i}, f_i) = \kappa_y \left\{ [a_{p,i} + (\omega_{i-1} + \omega_i)/2]^{k_y} - [a_{p,i} - (\omega_{i-1} + \omega_i)/2]^{k_y} \right\} f_i^{k_y} \cdot V_{c,i}^{k_y} \quad (13)$$

Определяйки стойността на граничното размерно износване $[VBr]_i$ и частта от допусковото поле $\varepsilon_{нд_i}$, може да се изчисли броят на поднастройките на системата МПЖД b_i на i -я проход използвайки зависимостта дадена в [4], тъй като величините ε_{nc_i} и $\varepsilon_{изм_i}$ се определят по същият начин, както при струговане с постоянен режим на рязане.

Спомагателното време на i -я проход $\tau_{мсп,i}$ включва само времето за изменение на режима на рязане преди следващият проход, подвеждането и отвеждането на инструмента,

$$\tau_{мсп,i} = \tau_{изм,i} + \tau_{под,i} + \tau_{от,i} \quad (14)$$

като

$$\tau_{от,i} = l_i / V_{от,i} \quad (15)$$

където l_i е дължина на пътя за отвеждане на прохода, mm; $V_{от,i}$ - скорост на отвеждане на прохода, mm/min.

Когато подготвително-заключителното време се определя за цялата операция, то за i -я проход

$$T_{нз,i} = 0.$$

Броят детайли, обработени за периода на трайност на инструмента е:

$$n_{T,i} = T_i / \tau_{p,i} \quad (16)$$

където T_i и $\tau_{p,i}$ са трайност и време на рязане на ножа за i -я проход.

Замествайки в (16) стойностите на T_i и $\tau_{p,i}$ по (2) и (5) се получава

$$n_{T,i} = \frac{l_i}{\sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_j}}{T_{ij}}} \quad (17)$$

С отчитане на изброените по-горе допълнения може да се запише израз за определяне на критерия за оптималност – технологическата себестойност на обработ-

ката за i -я проход при струговане на детайли със сложна форма

$$C_{T,i} = (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл})\kappa_p \cdot \tau_{p,i} + (R_{M,л} + R_3 + R_{3н})(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл}) \cdot (\tau_{рпш} \cdot b_i + \tau_{ни} + \tau_{смпш})\tau_{p_i} / T_i + B(I + \kappa_{спл}) \cdot \tau_{p_i} / T_i + (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})\tau_{мсп,i} \quad (18)$$

където $R_{M,л}$ - разходи за една минута работа на машината и приспособлението, лв./min; R_3 - разходите за заплати на основните работници за единица време, лв./min; κ_{nc} - коефициент за използване на работното време; T - трайност на инструмента, min; $R_{3н}$ - разход за заплата на настройчика за единица време; $\tau_{рпш}$ - време за работа на инструмента при една поднастройка, min; $\tau_{ни}$ - време за размерно настройване на инструмента, min; $\tau_{смпш}$ - време за смяна на инструмента, min; b - брой на поднастройките на инструмента; $\kappa_{спл}$ - коефициент, отчитащ случайните повреди на инструмента по време на работа, κ_p - коефициент на времето на рязане, който отчита връзването и излизането на ножа от обработваната повърхнина.

В разгънат вид израз (18) за технологическата себестойност за i -я проход при струговане на детайли със сложна форма, може да се представи по начина

$$C_{T,i} = (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл})\kappa_p \sum_{j=1}^n \tau_{p_j} + (R_{M,л} + R_3 + R_{3н})(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл}) \cdot \left\{ \kappa_{рпш} T_{рпш}^{\beta} \left[\frac{\sum_{j=1}^n VBr_{ij}}{\sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_j}}{T_{ij}}} + VBr_{oi} \right] \cdot \frac{l_i}{T_{pi} - \varepsilon_{nc_i} - \varepsilon_{изм_i} - T_{прш} - \max[\varepsilon_{нд_i}]} - I \right\} \cdot \left[\kappa_{ни} T_{ни}^{\beta} + \tau_{смпш} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_j}}{T_{ij}} + B(I + \kappa_{спл}) \sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_j}}{T_{ij}} \cdot (R_{M,л} + R_3) \left(\tau_{изм,i} + \tau_{под,i} + \frac{l_i}{V_{от,i}} \right) (I + \kappa_{nc}) \quad (19)$$

В случаят когато настройването се осъществява от работника, то $a_n = 0$. Ако допускът на получавания размер след прохода е по-голям от стойността на граничното размерно износване, което се получава при грубите проходи, не е необходимо поднастройка на системата МПЖД. Целевата функция в този случай изглежда така

$$C_{T,i} = (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл})\kappa_p \cdot \tau_{p,i} + (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})(I + \kappa_{спл}) \cdot (\tau_{ни} + \tau_{смпш})\tau_{p_i} / T_i + B(I + \kappa_{спл}) \cdot \tau_{p_i} / T_i + (R_{M,л} + R_3)(I + \kappa_{nc})\tau_{мсп,i} \quad (20)$$

Себестойността при многопроходно обработване на детайли със сложна форма е сума от разходите за извършване на всички проходи и разходите за спомагателни и подготвително-заключителни работи

$$C = \sum_{i=1}^M C_{T,i} + (R_{M,\Pi} + R_3)(I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \cdot \tau_{РСП} + (R_{M,\Pi} + R_3 + R_{ЗН}) \cdot \frac{T_{ПЗ}}{n}, \quad (21)$$

където M е брой проходи в операцията.

В (21) спомагателното време $\tau_{РСП}$ включва времето за установяване на заготовката, пускане и спиране на машината, сваляне на заготовката, контролни измервания, установяване на инструмента на предварително настроенния размер.

Понякога в методиките за изчисляване на оптималните режими на рязане в качеството на критерий за оптималност се използва не технологическата себестойност, която трябва да е минимална, а производителността, или единично-калкулационното време $\tau_{ед.к.}$, което се определя с израза

$$\tau_{ед.к.i} = (I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \kappa_p \cdot \tau_{p,i} + (I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \cdot (\tau_{РПИ} \cdot b_i + \tau_{НИ} + \tau_{СМИ}) \tau_{p_i} / T_i + (I + \kappa_{ИС}) \tau_{мен,i} \quad (22)$$

а в разгърнат вид

$$\tau_{ед.к.i} = (I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \kappa_p \sum_{j=1}^n \tau_{p_{ij}} + (I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \cdot \left\{ \kappa_{РПИ} \cdot T_{ПРИ_i}^\beta \left[\frac{\sum_{j=1}^n VBr_{ij}}{\sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_{ij}}}{T_{ij}}} + VBr_{0i} \right] \cdot \frac{I}{T_{p_i} - \varepsilon_{nc_i} - \varepsilon_{изм_i} - T_{ПРИ_i} - \max[\varepsilon_{НД_i}]} - I \right\} \cdot \kappa_{НИ} \cdot T_{НИ_i}^\beta + \tau_{СМИ} \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{\tau_{p_{ij}}}{T_{ij}} + (I + \kappa_{ИС}) \left(\tau_{изм,i} + \tau_{под,i} + \frac{l_i}{V_{от,i}} \right) \right\} \quad (23)$$

$$C_I = (R_{M,\Pi} + R_3)(I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \left(\frac{\pi \cdot l_1 \cdot d_1}{10^3 \cdot V_{c1} \cdot f_1} + \frac{\pi \cdot l_2 \cdot d_2}{10^3 \cdot V_{c2} \cdot f_2} \right) \cdot \kappa_p + (R_{M,\Pi} + R_3 + R_{ЗН})(I + \kappa_{ИС})(I + \kappa_{СПИ}) \cdot \left\{ \left[\kappa_{РПИ} \cdot T_{ПРИ_1}^\beta \left(\frac{VBr_0(10^{-3} C_T \cdot a_{p1}^x \cdot f_1^y \cdot V_{c1}^{\mu+1} + k_u)}{T_{p1} - \varepsilon_{nc_1} - \varepsilon_{изм_1} - T_{ПРИ_1} - \varepsilon_{НД_1}} - I \right) + \kappa_{НИ} \cdot T_{НИ_1}^\beta + \tau_{СМИ} \right] \cdot \frac{\pi \cdot l_1 \cdot d_1}{10^3 C_T \cdot a_{p1}^x \cdot f_1^y \cdot V_{c1}^{\mu+1}} + \left[\kappa_{РПИ} \cdot T_{ПРИ_2}^\beta \left(\frac{VBr_0(10^{-3} C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1} + k_u)}{T_{p2} - \varepsilon_{nc_2} - \varepsilon_{изм_2} - T_{ПРИ_2} - \varepsilon_{НД_2}} - I \right) + \kappa_{НИ} \cdot T_{НИ_2}^\beta + \tau_{СМИ} \right] \cdot \frac{\pi \cdot l_2 \cdot d_2}{10^3 C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1}} \right\} + B(I + \kappa_{СПИ}) \left(\frac{\pi \cdot l_1 \cdot d_1}{10^3 C_T \cdot a_{p1}^x \cdot f_1^y \cdot V_{c1}^{\mu+1}} + \frac{\pi \cdot l_2 \cdot d_2}{10^3 C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1}} \right) + (R_{M,\Pi} + R_3)(I + \kappa_{ИС})(\tau_{мен,1} + \tau_{мен,2} + \tau_{РСП}) + (R_{M,\Pi} + R_3 + R_{ЗН}) \cdot \frac{T_{ПЗ}}{n} \quad (26)$$

За вторият вариант на обработване, при определяне на $[VBr]_1$ и $[VBr]_2$ по (9), $\varepsilon_{НД_1}$ и $\varepsilon_{НД_2}$ по (10), обобщеният израз за себестойността на операцията е

а в разгърнат вид

Единично-калкулационното време при струговане на детайли със сложна форма е

$$\tau_{ед.к} = \sum_{i=1}^M \tau_{ед.к,i} + (I + \kappa_{ИС}) \tau_{РСП} + \frac{T_{ПЗ}}{n}, \quad (24)$$

където M е броя проходи в операцията.

В (22) и (23) стойностите $\tau_{p_{ij}}$, T_{ij} , VBr_{ij} , $\max[\varepsilon_{НД_i}]$ и l_i се определят според конкретният вариант на обработване в зависимост от геометричната конфигурация на заготовката и готовия детайл.

Като пример може да се разгледа определянето на себестойността при струговане на конусни повърхнини от изходна заготовка с цилиндрична форма (фиг. 1,а). При положение, че обработването се извършва за два прохода са възможни следните варианти за снемане на прибавката:

1. Два прохода се извършват успоредно на оста на въртене на вретеното с постоянни V_c, f, a_p (фиг. 1,б);
2. Първият проход се извършва с променлива дълбочина на рязане a_p и постоянни f и V_c , вторият – с променлива скорост V_c и постоянни f и a_p (фиг. 1,в);
3. Първият проход се извършва с променливи a_p и f и с постоянни скорост V_c и площ на срязвания слой K , вторият – с постоянни V_c, f, a_p (фиг. 1,г);
4. Първият проход се извършва с променливи a_p и f и с постоянни скорост V_c и сила на рязане F_c , а вторият – с постоянни V_c, f, a_p (фиг. 1,д).

За първият вариант на обработване $\tau_{p,i}$ се определя по (1), T_i по (4), $[VBr]_i$ по (6), $\varepsilon_{НД_i}$ по (10). Изразът за себестойността на операцията в обобщен вид е

$$C_I = C_1 + C_2 + (R_{M,\Pi} + R_3)(I + \kappa_{ИС}) \cdot \tau_{РСП} + (R_{M,\Pi} + R_3 + R_{ЗН}) \cdot \frac{T_{ПЗ}}{n}, \quad (25)$$

а в разгърнат вид

$$C_{II} = C_1 + C_2 + (R_{M,\Pi} + R_3)(I + \kappa_{ИС}) \tau_{РСП} + (R_{M,\Pi} + R_3 + R_{ЗН}) \cdot \frac{T_{ПЗ}}{n}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 C_{II} = & (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC})(I + \kappa_{CIII}) \left(\frac{d_{\kappa 1} - d_{n1}}{2n_{c1} \cdot f_1 \cdot \sin \alpha} + \frac{d_{\kappa 2} - d_{n2}}{2n_{c2} \cdot f_2 \cdot \sin \alpha} \right) \kappa_p + \\
 & + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H})(I + \kappa_{HC})(I + \kappa_{CIII}) \cdot \\
 & \cdot \left[\kappa_{PIII} \cdot T_{PPII_1}^\beta \left(\frac{(1-x)(\cos \alpha)^{q+x} C_u \cdot C_T \cdot f_1^{y+u} \cdot V_{c1}^{\mu+1}}{(q+I)2^{q+x} [(D_3 - d_{n1})^{1-x} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{1-x}]} \cdot \frac{[(D_3 - d_{n1})^{q+1} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{q+1}]}{T_{p1} - \varepsilon_{nc_1} - \varepsilon_{изм_1} - T_{PPII_1} - \max[\varepsilon_{HD_1}]} - I \right) + \kappa_{HHI} \cdot T_{HHI}^\beta + \tau_{CIII} \right] \cdot \\
 & \cdot \frac{2^x [(D_3 - d_{n1})^{1-x} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{1-x}]}{(1-x) \sin 2\alpha (\cos \alpha)^{x-1} \cdot C_T \cdot f_1^{y+1} \cdot V_{c1}^\mu \cdot n_{c1}} + \\
 & + \left[\kappa_{PPII} \cdot T_{PPII_2}^\beta \left(\frac{(1-\mu) C_u \cdot C_T \cdot a_{p2}^{q+x} \cdot f_2^{y+u} \cdot (\pi \cdot n_{c2})^{\mu+m} (d_{\kappa 2}^{m+1} - d_{n2}^{m+1})}{(1+m)(d_{\kappa 2}^{1-\mu} - d_{n2}^{1-\mu}) (T_{p2} - \varepsilon_{nc_2} - \varepsilon_{изм_2} - T_{PPII_2} - \max[\varepsilon_{HD_2}])} - I \right) + \kappa_{HHI} \cdot T_{HHI}^\beta + \tau_{CIII} \right] \cdot \\
 & \cdot \frac{d_{\kappa 2}^{1-\mu} - d_{n2}^{1-\mu}}{2n_{c2} \cdot f_2 \cdot (1-\mu) \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot (\pi \cdot n_{c2})^\mu} \Bigg\} + \\
 & + B(I + \kappa_{CIII}) \left(\frac{2^x [(D_3 - d_{n1})^{1-x} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{1-x}]}{(1-x) \sin 2\alpha (\cos \alpha)^{x-1} \cdot C_T \cdot f_1^{y+1} \cdot V_{c1}^\mu \cdot n_{c1}} + \frac{d_{\kappa 2}^{1-\mu} - d_{n2}^{1-\mu}}{2n_{c2} \cdot f_2 \cdot (1-\mu) \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot (\pi \cdot n_{c2})^\mu} \right) + \\
 & + (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC})(\tau_{мен,1} + \tau_{мен,2} + \tau_{PCII}) + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H}) \cdot \frac{T_{II3}}{n}
 \end{aligned} \tag{28}$$

За третият вариант на обработване, при определяне на T_2 по (4), $[VBr]_I$ по (9), $[VBr]_2$ по (6), ε_{HD_1} по (10) и ε_{HD_2} по (13), обобщеният израз за себестойността на операцията е

$$\begin{aligned}
 C_{III} = & C_1 + C_2 + (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC}) \cdot \tau_{PCII} + \\
 & + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H}) \cdot \frac{T_{II3}}{n}
 \end{aligned} \tag{29}$$

а в разгърнат вид

$$\begin{aligned}
 C_{III} = & (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC})(I + \kappa_{CIII}) \left[\frac{ctg \alpha}{8n_{c1} \cdot K} [2D_3(d_{\kappa 1} - d_{n1}) - (d_{\kappa 1}^2 - d_{n1}^2)] + \frac{\pi(d_{\kappa 2}^2 - d_{n2}^2)}{4V_{c2} \cdot f_2 \cdot \sin \alpha} \right] \kappa_p + \\
 & + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H})(I + \kappa_{HC})(I + \kappa_{CIII}) \cdot \\
 & \cdot \left\{ \left[\kappa_{PPII} \cdot T_{PPII_1}^\beta \left(\frac{2^{y-x}(y-x+2)(\cos \alpha)^{q-u} C_u \cdot C_T \cdot K^u}{2^{q-u}(q-u+2)(\cos \alpha)^{y-x}} \cdot \frac{V_{c1}^{\mu+m} [(D_3 - d_{n1})^{y-x+2} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{y-x+2}]}{[(D_3 - d_{n1})^{q-u+2} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{q-u+2}] (T_{p1} - \varepsilon_{nc_1} - \varepsilon_{изм_1} - T_{PPII_1} - \max[\varepsilon_{HD_1}])} - I \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \kappa_{HHI} \cdot T_{HHI}^\beta + \tau_{CIII} \right] \cdot \frac{ctg \alpha (\cos \alpha)^{y-x} [(D_3 - d_{n1})^{y-x+2} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{y-x+2}]}{n_{c1} \cdot K (y-x+2) \cdot 2^{y-x+2} \cdot C_T \cdot V_{c1}^\mu} + \right. \\
 & \left. + \left[\kappa_{PPII} \cdot T_{PPII_2}^\beta \left(\frac{VBr_0 (10^{-3} C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1} + k_u)}{T_{p2} - \varepsilon_{nc_2} - \varepsilon_{изм_2} - T_{PPII_2} - \varepsilon_{HD_2}} - I \right) + \kappa_{HHI} \cdot T_{HHI}^\beta + \tau_{CIII} \right] \cdot \frac{\pi(d_{\kappa 2}^2 - d_{n2}^2)}{4 \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^{y+1} \cdot V_{c2}^{\mu+m}} \right\} + \\
 & + B(I + \kappa_{CIII}) \left\{ \frac{ctg \alpha (\cos \alpha)^{y-x} [(D_3 - d_{n1})^{y-x+2} - (D_3 - d_{\kappa 1})^{y-x+2}]}{n_{c1} \cdot K (y-x+2) \cdot 2^{y-x+2} \cdot C_T \cdot V_{c1}^\mu} + \frac{\pi(d_{\kappa 2}^2 - d_{n2}^2)}{4 \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^{y+1} \cdot V_{c2}^{\mu+1}} \right\} + \\
 & + (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC})(\tau_{мен,1} + \tau_{мен,2} + \tau_{PCII}) + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H}) \cdot \frac{T_{II3}}{n}
 \end{aligned} \tag{30}$$

За четвъртия вариант на обработване, при определяне на T_2 по (4), $[VBr]_I$ по (9), $[VBr]_2$ по (6), ε_{HD_1} по (10) и ε_{HD_2} по (13), обобщеният израз за себестойността на операцията е

$$\begin{aligned}
 C_{IV} = & C_1 + C_2 + (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{HC}) \cdot \tau_{PCII} + \\
 & + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H}) \cdot \frac{T_{II3}}{n}
 \end{aligned} \tag{31}$$

а в разгърнат вид

$$\begin{aligned}
C_{IV} = & (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{IC})(I + \kappa_{CIII}) \left\{ \frac{(\cos \alpha)^{I+B} \left[(D_3 - d_{n1})^{I+B} - (D_3 - d_{k1})^{I+B} \right]}{2 \cdot B' \cdot n_c \cdot A \cdot \sin 2(I+B')} + \frac{\pi(d_{k2}^2 - d_{n2}^2)}{4 \cdot f_2 \cdot V_{c2} \cdot \sin \alpha} \right\} \cdot \kappa_p + \\
& + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H})(I + \kappa_{IC})(I + \kappa_{CIII}) \cdot \\
& \left\{ \left[\kappa_{PIII} \cdot T_{ПРИ1}^\beta \left\{ \frac{2^{B'_y-x} (B'_y + B' + I - x) (\cos \alpha)^{q+x-B'_y-B'_x} \cdot A^{u+y} \cdot C_u \cdot C_T \cdot V_{c1}^{\mu+m} \left[(D_3 - d_{n1})^{B'+q+I-B'_y} - (D_3 - d_{k1})^{B'+q+I-B'_y} \right]}{2^{q-B'_y} (B' + q + I - B'_u) \left[(D_3 - d_{n1})^{B'_y+B'+I-x} - (D_3 - d_{k1})^{B'_y+B'+I-x} \right]} \right] (T_{p1} - \varepsilon_{nc1} - \varepsilon_{изм1} - T_{ПРИ1} - \max[\varepsilon_{HD1}]) - I \right\} + \right. \\
& \left. + \kappa_{НИ} T_{НИ1}^\beta + \tau_{СМИ} \right\} \cdot \frac{(\cos \alpha)^{B'_y+B'+I-x} \left[(D_3 - d_{n1})^{B'_y+B'+I-x} - (D_3 - d_{k1})^{B'_y+B'+I-x} \right]}{2^{B'_y+B'-x} \cdot n_{c1} \cdot A^{y+1} \cdot \sin 2\alpha \cdot C_T \cdot V_{c1}^\mu \cdot (B'_y + B' + I - x)} + \\
& + \left\{ \kappa_{PIII} \cdot T_{ПРИ2}^\beta \left[\frac{VBr_0 (10^{-3} C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1} + k_u)}{T_{p2} - \varepsilon_{nc2} - \varepsilon_{изм2} - T_{ПРИ2} - \varepsilon_{HD2}} - I \right] + \kappa_{НИ} T_{НИ2}^\beta + \tau_{СМИ} \right\} \cdot \frac{\pi(d_{k2}^2 - d_{n2}^2)}{4 \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1}} + \\
& + B(I + \kappa_{CIII}) \left\{ \frac{(\cos \alpha)^{B'_y+B'+I-x} \left[(D_3 - d_{n1})^{B'_y+B'+I-x} - (D_3 - d_{k1})^{B'_y+B'+I-x} \right]}{2^{B'_y+B'-x} \cdot n_{c1} \cdot A^{y+1} \cdot \sin 2\alpha \cdot C_T \cdot V_{c1}^\mu \cdot (B'_y + B' + I - x)} + \frac{\pi(d_{k2}^2 - d_{n2}^2)}{4 \sin \alpha \cdot C_T \cdot a_{p2}^x \cdot f_2^y \cdot V_{c2}^{\mu+1}} \right\} + \\
& + (R_{M,II} + R_3)(I + \kappa_{IC})(\tau_{мен,1} + \tau_{мен,2} + \tau_{PCII}) + (R_{M,II} + R_3 + R_{3H}) \cdot \frac{T_{ПЗ}}{n}
\end{aligned} \tag{32}$$

В (32) значенията на A и B се определят със зависимостите

$$A = const = \left(\frac{F}{C_F \cdot V_c^{\mu_F}} \right)^{\frac{1}{y_F}}; \quad B = \frac{x_F}{y_F},$$

където C_F , x_F , y_F , μ_F са емпирични параметри.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

• Изрази (26), (28), (30) и (32) дават възможност за определяне на оптималният режим на рязане за проходите в операцията (прехода), минимизиращ технологическата себестойност, като сравнявайки оптималните (минимални) себестойности за всички възможни варианти на обработване, е възможно да се обоснове оптималният вариант.

• По аналогичен начин може да се получат изрази за себестойността C или единично-калкулационното време $t_{ед,к}$ при струговане на детайли със сложна форма в случаите на:

- настройване и поднастройване на системата МПДИД, от оператора;
- настройване от настройчика, поднастройване - от оператора;
- настройване и поднастройване - от настройчика с помощта на оператора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузманов Т., Хр. Метев. Износване и трайност на инструментите при обработване на детайли със сложни повърхнини върху стругови машини с ЦПУ, ч.1: С променлива дълбочина на рязане, Г., Известия на ТУ-Габрово, т. 33, 2006, с. 36-39.
- [2] Метев Хр., Т. Кузманов. Износване и трайност на инструментите при обработване на детайли със сложни повърхнини върху стругови машини с ЦПУ, ч.2: С поддържане на постоянен технологически параметър, Г., Известия на ТУ-Габрово, т. 33, 2006, с. 40-44.
- [3] Метев Хр., Т. Кузманов. Износване и трайност на инструментите при обработване на детайли със сложна форма върху стругови машини с ЦПУ с променлива скорост на рязане, Г., Известия на ТУ-Габрово, т. 34, 2007, с. 46-49.
- [4] Кузманов Т., Хр. Метев, К. Крумов. Математически модел на обработване на детайли със сложна ротационна форма върху машини с ЦПУ, Г., Известия на ТУ-Габрово, т. 46, 2013, с. 44-47.
- [5] Кузманов Т., Х. Метев. Технология на машиностроенето ч.1 (Основи на машиностроителните технологии). Изд. „ЕКС-ПРЕС“ ООД – Габрово, Г., 2005.
- [6] Справочник на технолога по механична обработка, т. 1, под ред. Пашов С.К., С., Техника, 1989.
- [7] Клушин Н. И., Гостев Г. В. Применение электронно-вычислительных машин при оптимизации режима резания. Горький, ГПИ, 1982, 88с.
- [8] Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Протопопов С. П., Рыбкин И. М., Тимирязев В. А. Адаптивное управление технологическими процессами. М. Машиностроение, 1980, 536с.