

УДК 621.9(075.8)

В. В. Ступницький, С. В. Ступницький
Національний університет “Львівська політехніка”

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗАГАРТОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПРЕС-ФОРМ

© Ступницький В. В., Ступницький С. В., 2016

Наведено методику та приклад багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу механічного оброблення загартованих поверхонь деталей прес-форми. Найефективнішими локальними критеріями оптимізації є зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість і корозійна стійкість продукції.

Наведено методологію досліджень і алгоритм оптимізації.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, механічне оброблення, зносостійкість, втомна міцність, контактна жорсткість, корозійна стійкість.

The principles and example of multicriterion structural and parametric optimization of the functionally-oriented technological machining process of mold's parts hardened surfaces are described in the article. The most essential criteria of optimization are wearproofness, fatigue strength, contact stiffness and corrosion resistance of production. Methodology of researches and algorithm of optimization are shown in the article.

Key words: multicriterion optimization, machining process, wearproofness, fatigue strength, contact stiffness, corrosion resistance.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Системний підхід до технологічного забезпечення працездатності виробів машинобудування ґрунтується, з одного боку, на оцінці показників якості деталей цих виробів, що характеризують їхню геометричну форму, мікротопологію поверхневого шару та його фізико-механічні властивості (зокрема залишкові) залежно від технологічних чинників і, з іншого боку, на прогнозуванні експлуатаційних властивостей (зносостійкості, контактної жорсткості, корозійної стійкості тощо) виробів залежно від показників їхньої якості. Очевидно, що забезпечення лише окремих локальних показників якості функціональних поверхонь комплектуючих деталей не гарантуватиме оптимальних експлуатаційних властивостей виробу загалом, натомість необхідно проектувати функціонально-орієнтований технологічний процес, що ґрунтується на аналізі сукупності взаємопов'язаних експлуатаційних показників виробу [1].

У сучасному машинобудуванні особливу складність становить виготовлення різних деталей штампів і прес-форм тощо. Це зумовлено їхньою високою точністю, низькою шорсткістю функціональних поверхонь, значними температурними флуктаціями в процесі експлуатації (до 500–700 °С), складним матеріалом цих деталей з погляду його оброблюваності, високою частотою та інтенсивністю циклічних та знакозмінних навантажень тощо. Особливу увагу під час експлуатації прес-форм приділяють виштовхувачам. Відповідно до наведеної в [2] статистики відмов функціональних деталей та вузлів прес-форм, на систему виштовхування припадає 25–30 % всіх збоїв під час роботи та поломок цих виробів. Це спричинено складними високочастотними термодинамічними умовами експлуатації виштовхувачів, проблемами охолодження у поєднанні з їх нежорсткою конструкцією (співвідношення довжини до діаметра в межах 15–20), вимогами надщільної герметичності рухомого з'єднання, зносостійкості, втомної міцності та високої якості виготовлення (точність розмірів – 5–7 квалітет, параметр шорсткості функціональних поверхонь –

0,2–0,8 мкм тощо). На робочій поверхні прес-форми вкладиші з виштовхувачами утворюють стик, який може змінитися. У цей проміжок затікає рідкий метал, утворюючи облой-затоку на поверхні вилівка. Тому проміжок між виштовхувачем і отвором у вкладиші виконують в межах 0,08–0,1 мм. Проміжок має бути максимально допустимий, він залежить від використання матеріалів для виготовлення вкладишів і виштовхувачів, матеріалу вилівка, температури заливки, температури підігрівання прес-форм, швидкості потоку рідкого металу, питомого тиску на стінки робочої порожнини та інших чинників [2].

У наведеному нижче прикладі виштовхувачі виготовляють з високолегованої низьковуглецевої сталі 3X2B8Ф (ГОСТ 5950-90)¹. Під час експлуатації саме цей елемент конструкції підлягає інтенсивному зношуванню і знакозмінним силовим та термічним навантаженням, які у поєднанні здатні спричинити втрату функціональності прес-форми загалом. Тому найважливішими експлуатаційними властивостями виштовхувачів є зносостійкість, контактна жорсткість, втомна міцність та корозійна стійкість (запобігання корозійному мікророзтріскуванню). Перелічені вище експлуатаційні властивості істотно залежать від таких показників якості поверхні, як мікротопологія функціональних поверхонь, мікротвердість (твердість поверхневого шару), залишкові напруження та деформації, їх характер та глибина залягання.

Показники якості робочої поверхні формуються, здебільшого, на завершальній стадії процесу виготовлення виштовхувача, коли здійснюють чистове точіння і алмазне вигладжування фасонного профілю. Саме завершальна стадія виготовлення виштовхувача детально досліджена в цьому прикладі. Принципи функціонально-орієнтованого технологічного формування показників якості виробу спрямовані на те, щоб за заданих значень показників якості готової деталі, відомого діапазону значень показників початкової заготовки і з урахуванням інформації про їхню трансформацію, технологічну спадковість і взаємний вплив у процесі формоутворення функціональних поверхонь розробити найефективніший маршрутно-операційний технологічний процес для забезпечення оптимального поєднання показників якості виробу.

Вклад основного матеріалу. Розглянемо реалізацію двох варіантів маршруту оброблення найточніших загартованих циліндричних поверхонь виштовхувачів на викінчувальній операції.

Перший варіант. Викінчувальне шліфування абразивним кругом.

Другий варіант. Тонке точіння лезовим інструментом на основі полікристалічного кубічного нітриду бору (60 % CBN) (запропоновано використання пластини від компанії Sandvik Coromant з геометрією Wiper марки CB7025 з керамічною зв'язкою).

Композиційний сплав CB7025 являє собою матеріал, що містить 60 % CBN з бімодальним розподілом зерен (1 і 3 мкм) у керамічній зв'язці. Висока стійкість до руйнування робить його універсальним сплавом для твердого точіння. Для лезового оброблення запропоновано використання пластини Wiper від Sandvik Coromant з геометрією типу WH. На відміну від пластин типу XCEL, такі пластини мають вершини, що являють собою комбінацію декількох різних радіусів, що знижує шорсткість обробленої поверхні за заданих режимів різання. Кріплення iLock забезпечує надзвичайно високу надійність закріплення і стабільність позиціонування ріжучої пластини в гнізді державки. Система CoroTurnTR виключає мікропереміщення пластини, які можуть відбуватися під час профільного оброблення через дії змінних різноспрямованих сил різання, спричинених зміною траєкторії переміщення інструменту [3].

Під час шліфування функціональних поверхонь прецизійних деталей виникають проблеми, що в умовах подальшої експлуатації негативно впливатимуть на функціонування виробу. По-перше, прогріваючись у процесі абразивного оброблення, метал в тонких поверхневих шарах проходить специфічну термообробку, в результаті якої відбуваються структурні перетворення і виникають припали; порушується однорідність структури, сталість твердості, на поверхні з'являється залишкове розтягувальне напруження, що негативно позначається на зносостійкості й контактній міцності загартованих деталей. По-друге, у зв'язку з великими швидкостями нагрівання

¹ Аналог – 316L (США), 30WCrV17-2 (Німеччина), SKD5 (Японія).

й охолодження, що виникають внаслідок значних перепадів температур по перерізу деталі та в часі, в поверхневих тонких шарах металу можливі такі поточні й залишкові напруження розтягу (зсуву), які у разі перевищення межі міцності металу призводять до утворення мікротріщин і, як наслідок, до різкого зменшення довговічності деталей.

Для визначення основних критеріїв ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення вищенаведених виштовхувачів прес-форми необхідно проаналізувати механізми формування параметрів зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості тощо. Для цього в САФ-системі побудуємо імітаційну реологічну модель формоутворення основних функціональних поверхонь виштовхувачів та визначимо показники напружено-деформованого стану (зокрема залишкові), параметри мікротопології поверхні та його структурно-фазового стану в результаті різання [12].

Відповідно до наведеного в [1] алгоритму структурно-параметричної оптимізації передусім потрібно реалізувати етап розрахунку локальних критеріїв оптимізації. Одним з найважливіших критеріїв є показник інтенсивності зношування функціональних поверхонь у потенційних або критичних умовах експлуатації виробу залежно від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення найнавантажених поверхонь виробу. Причому такий розрахунок виконують на основі концепції зношування згідно з нормативними рекомендаціями Р.50-95-88 “Забезпечення зносостійкості виробів” та ДСТУ 2823-94 [5]. Важливо сформулювати початкові умови для подальшого розрахунку: розглядається зношування двох повністю спряжених тіл у стаціонарному (сталому) режимі сухого або граничного тертя; зношуванню підлягає виштовхувач прес-форми: тіло – жорстке і шорстке; спряжена напрямна втулка розглядається як гладке і деформоване контртіло; номінальний тиск, швидкість ковзання і температура тертя постійні в часі й рівномірно розподілені по поверхні контакту.

Для визначення умов пружності або пластичності трибоконтракту необхідно розрахувати індекс пластичності за формулою Вільямсона–Грінвуда [6]. Вважається, що мікрровиступ деформується абсолютно пружно за умови:

$$\frac{R_{\max}}{r^2} < K_m \frac{s_T (1 - m^2)}{E}, \quad (1)$$

де r – приведений радіус плями контакту; s_T – межа текучості матеріалу (для сталі 3Х2В8Ф $s_T = 1390$ МПа); K_m – коефіцієнт, що залежить від умов деформування (приймаємо $K_m = 7$ [126]); m – коефіцієнт Пуассона ($m=0,28$); E – модуль Юнга (для сталі 3Х2В8Ф за 700°C $E = 1,77 \cdot 10^5$ МПа).

Для випадку фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки СВ7025 виконується умова, що є ознакою пружності контакту:

$$\frac{2,0}{35^2} = 0,0016 < 7 \frac{1390(1 - 0,28^2)}{1,77 \cdot 10^5} = 0,05.$$

Аналогічно для випадку шліфування алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 контакт вважається пружним, оскільки виконується умова:

$$\frac{2,2}{20^2} = 0,0055 < 7 \frac{1390(1 - 0,28^2)}{1,77 \cdot 10^5} = 0,05.$$

Отже, в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь (b , v , R_{vk} , R_{pk} , R_k , R_{\max} , t_m), механічних властивостей матеріалів (σ_T , σ_b , $\sigma_{0,2}$, E , μ), коефіцієнта тертя f , втомної характеристики t і тисків – номінального P_a і контурного P_c .

I – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на інтенсивність зношування (за умови, що границя втомної міцності для сталі 3Х2В8Ф – $\sigma_b=1530$ МПа; – коефіцієнт фрикційної втоми за пружного контакту спряжених поверхонь $t_y=3$), визначається за формулою:

для точіння:

$$I_1 = \left(\frac{1530 - 143}{1530} \right)^3 = 0,75;$$

для шліфування:

$$I_2 = \left(\frac{1530 - (-130)}{1530} \right)^3 = 1,27.$$

Інтенсивність зношування виробу за заданих умов його експлуатації у випадку і-го варіанта технологічного процесу виготовлення цього виробу можна записати так [7]:

$$I_{hi} = \frac{0,6(1 - m^2) \cdot P_a \cdot I_i}{\sqrt{n_i} (n_i^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (2)$$

Тоді відносний показник зносостійкості $K(I_h)$, який характеризує зміну інтенсивності зношування залежно від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\left[\frac{0,6(1 - m^2) \cdot P_a \cdot I_1}{\sqrt{n_1} (n_1^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]}{\left[\frac{0,6(1 - m^2) \cdot P_a \cdot I_2}{\sqrt{n_2} (n_2^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]} = \frac{\sqrt{n_2} (n_2^2 - 1) \cdot I_1}{\sqrt{n_1} (n_1^2 - 1) \cdot I_2}, \quad (3)$$

де n_i – параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота.

Порівнюючи фінішне токарне оброблення виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) та його шліфування алмазним кругом ACB 125/100 M5-2 (режими різання $V_k=31$ м/с, $t=0,01$ мм, $S_n=6$ м/хв), отримуємо відносний показник зносостійкості $K(I_h)$:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{1,9} (1,9^2 - 1) \cdot 0,75}{\sqrt{1,7} (1,7^2 - 1) \cdot 1,27} = 0,86.$$

Тобто в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми зносостійкість функціональної поверхні зростає приблизно на 14 % внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру і номінальних значень залишкових напружень.

Серед важливих експлуатаційних чинників роботи виштовхувача прес-форми відзначимо відносний показник втомної міцності. Загалом на коефіцієнт запасу втомної міцності n_{-1} впливає кілька конструкторсько-технологічних чинників: ефективний коефіцієнт концентрації напружень (n_{eK}); коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі (n_{eD}); коефіцієнт впливу поверхневого зміцнення; (n_{eV}) коефіцієнт впливу шорсткості поверхні (n_{eR}) та коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникли в результаті механічного оброблення деталі (n_{eZ}). Причому тільки два останні показники залежать від якості поверхневого шару виробу, на формування якого впливають структура та параметри технологічного процесу його виготовлення.

Коефіцієнт впливу шорсткості функціональної поверхні виштовхувача прес-форми n_{eR1} у випадку його фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 можна визначити за формулою Степнова [8]:

$$n_{eR1} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{S_g}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,0 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,94. \quad (4)$$

Аналогічно, цей коефіцієнт для випадку шліфування виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 становитиме:

$$n_{eR_2} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{S_e}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,2 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,93. \quad (5)$$

Своєю чергою, коефіцієнт впливу залишкових деформацій n_{eZ} функціональної поверхні виштовхувача прес-форми n_{eR1} у разі його фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки СВ7025 визначається залежно від інтерференційного домінування залишкових напружень першого і другого роду стиску s_{el}^+, s_{ell}^+ і розтягу s_{el}^-, s_{ell}^- :

$$n_{eZ_1} = \frac{s_{-1} + (s_{el}^+ + s_{ell}^+)}{s_{-1}} = \frac{780 + 155}{780} = 1,18, \quad (6)$$

де $s_{-1} = 780$ МПа – межа міцності матеріалу під час випробовування на розтяг–стиск у віднульовому циклі навантаження, характерному для роботи виштовхувача прес-форми [9].

У разі шліфування виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2:

$$n_{eZ_2} = \frac{s_{-1} - (s_{el}^- + s_{ell}^-)}{s_{-1}} = \frac{780 - 130}{780} = 0,83.$$

Інші коефіцієнти не залежать від якості поверхневого шару деталі, а тому не матимуть значення для структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу оброблення виштовхувача прес-форми за функціонально-орієнтованими критеріями.

Тоді відносний показник втомної міцності $K(n_{-1})$, що характеризує зміну коефіцієнта запасу втомної міцності n_{-1} залежно від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{-1_1}}{n_{-1_2}} = \frac{n_{eR_1} \cdot n_{eZ_1}}{n_{eR_2} \cdot n_{eZ_2}} = \frac{0,94 \cdot 1,18}{0,93 \cdot 0,83} = 1,43. \quad (7)$$

Тобто в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми втомна міцність функціональної поверхні зростає приблизно на 43 % внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру і номінальних значень залишкових напружень.

У наукових роботах [9, 10, 11] доведено, що усі процеси руйнування поверхні, особливо у разі циклічного навантаження, залежать від будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості поверхні металу істотно зростає за корозійної втоми, спричиненої пошкодженням унаслідок виникнення на функціональних поверхнях корозійних каверн. На деталях прес-форм внаслідок дії явища фретинг-корозії утворюються мікротріщини та місцеві концентрації напружень, що є причиною подальшої ерозії найнавантажених поверхонь деталей, особливо під впливом високошвидкісних температурних деформацій та наявного хімічно агресивного середовища. Механізм формування хімічної складової руйнування за фретинг-корозії [11] полягає в тому, що нерівності однієї поверхні стирають нерівності протилежної, проробляючи борозну з усередненою глибиною $(R_{pk} + R_k)$; у міжповерхневому проміжку адсорбується газ або відбувається окиснення спряжених поверхонь; подальші переміщення мікроставів руйнують оксидну плівку. Вони можуть також механічно активувати реакцію адсорбції кисню на металі й сприяти утворенню оксиду, який, своєю чергою, також стирається. Причому саме величина ділянок мікронерівностей профілю, що виступають, – Rpk_{ekv} та Rk_{ekv} , внаслідок корозійного зношування формує механічну складову такого руйнування.

У разі фретинг-корозії показники корозійної стійкості в об'ємному еквіваленті t_m визначають з урахуванням того, що зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину становитиме [11]:

$$\Delta m = (Rp k_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln \left(\frac{t}{t} + 1 \right). \quad (8)$$

У цьому випадку апроксимуємо взаємодію шорстких поверхонь у вигляді контакту сферичної поверхні та пластичного площинного півпростору за методикою А. Ю. Ішлінського [7]. Тоді відносний показник швидкості фретинг-корозійного руйнування $K(t)$ визначається за формулою:

$$\begin{aligned} K(t) &= \frac{t_{m_1}}{t_{m_2}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{(Rp k_1 + Rk_1) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln \left(\frac{t}{t} + 1 \right)}{(Rp k_2 + Rk_2) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln \left(\frac{t}{t} + 1 \right)} = \\ &= \frac{(Rp k_1 + Rk_1)}{(Rp k_2 + Rk_2)} = \frac{0,28 + 0,84}{0,43 + 0,61} = 1,07. \end{aligned} \quad (9)$$

Тобто в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми інтенсивність фретинг-корозії функціональної поверхні зростає приблизно на 7 % внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні.

Оскільки одним з найважливіших критеріїв працездатності рухомих з'єднань є дотримання режиму рідинного тертя між спряженими поверхнями деталей забезпеченням мінімальної товщини мастильної плівки в зоні їх трибоконтакту, необхідно розглянути як критерій ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу забезпечення несучої здатності плівки, що може втрачатись внаслідок надмірного навантаження опори за недостатньої швидкості ковзання або внаслідок теплового руйнування. Зростання коефіцієнта тертя призводить до того, що прогресуватиме збільшення тепловиділення доти, доки температура мастильної плівки досягне критичного значення, за якого втрачаються її змащувальні властивості й виникає безпосередній контакт мікроступів трибоспряжень. Відносний показник коефіцієнта надійності роботи механічної системи в режимі рідинного трибоконтакту $K(S)$ визначають за формулою [6]:

$$K(S) = \frac{h_{\min_1}}{h_{\min_2}} = \frac{k_s \cdot Rvk_1}{k_s \cdot Rvk_2} = \frac{Rvk_1}{Rvk_2} = \frac{0,17}{0,18} = 0,94. \quad (10)$$

Триботехнічна якість спряжень визначається енергетичними втратами на тертя у спряжених поверхнях деталей машин. Відносний показник $K(f)$, який характеризує зміну коефіцієнта тертя у спряженій трибопарі залежно від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою [14]:

$$K(f) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/n_1}}}}{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/n_1}}}} = \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_2}} = \sqrt{\frac{0,024}{0,096}} = 0,5. \quad (11)$$

Фрагмент програми розрахунку узагальненого нормативного критерію оптимізації структурно-параметричного варіанта технологічного рішення, реалізованого за допомогою розробленої автором [12] програми з використанням програмних продуктів EXCEL та Visual Basic, показано на рис. 1.²

² Методику та програму багатокритеріальної оптимізації розробив С. В. Ступницький.

**Підпрограма лінійного нормування
кваліметричних критеріїв оптимізації
функціонально-орієнтованого технологічного процесу**

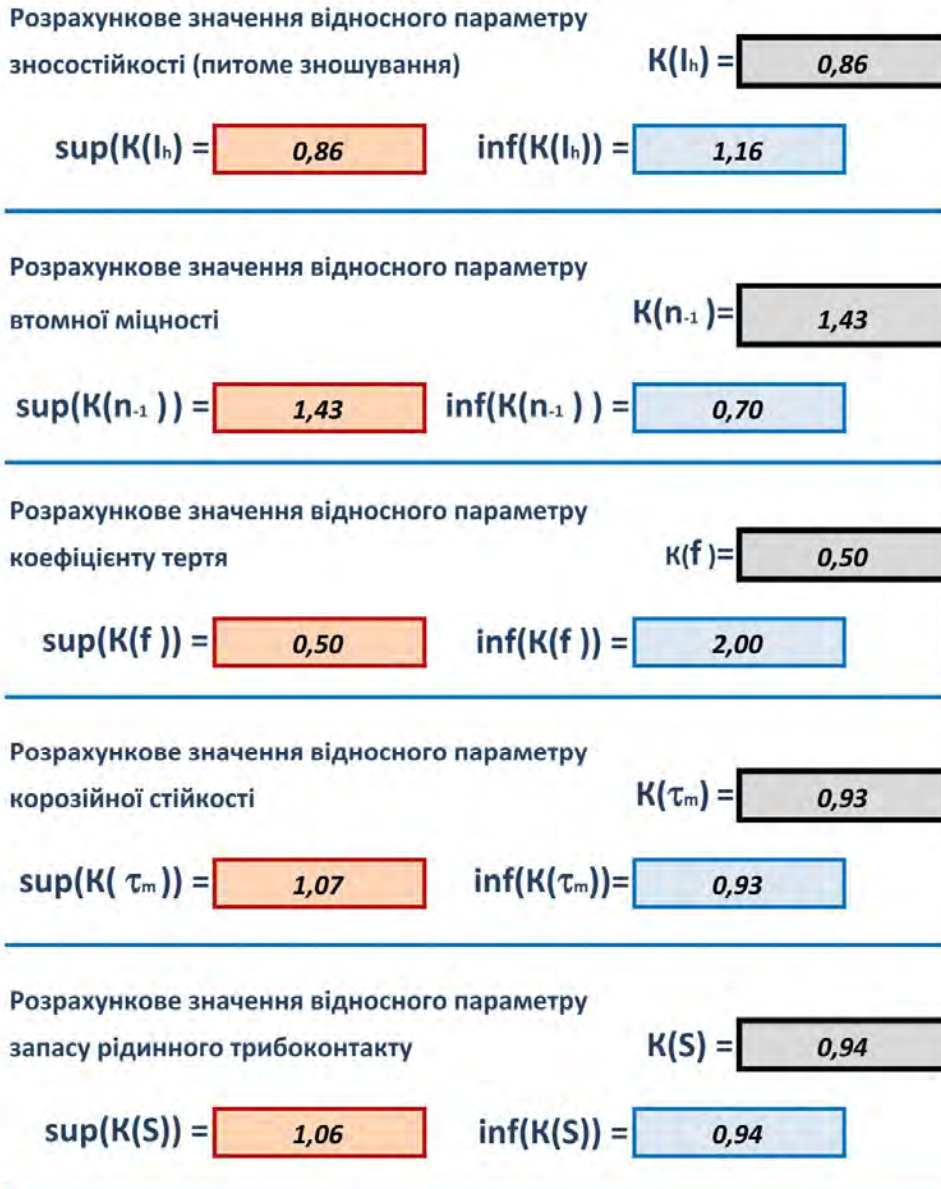


Рис. 1. Фрагмент підпрограми лінійного нормування кваліметричних критеріїв та розрахунку функції мети структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки – сталь 3Х2В8Ф)

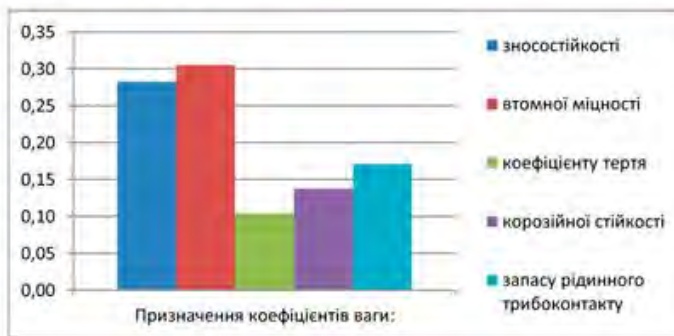
Розрахунок ненормалізованих локальних критеріїв оптимізації за кваліметричними показниками для фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) виконується за наведеним в [12] алгоритмом і становить для цього прикладу за відносними показниками зносостійкості $Q_1 = 0,28$; за коефіцієнтом запасу втомної міцності $Q_2 = 0,30$; за параметром триботехнічної якості спряжень $Q_3 = 0,10$; за

параметром корозійної стійкості $Q_4 = -0,14$; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту $Q_5 = -0,17$. Остаточню узагальнену критерій оптимізації становить $F_1 = 0,383$. Оскільки в цьому прикладі порівнювали лише два варіанти технологічного процесу, узагальнений критерій оптимізації для випадку шліфування функціональної поверхні виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 (режими різання $V_k = 31$ м/с, $t = 0,01$ мм, $S_n = 6$ м/хв) становитиме відповідно $F_2 = -0,383$.

Призначення коефіцієнтів ваги:



$\Sigma = 1,00$



$$Q_1 = \left(\frac{I_h - \inf(I_h)}{\sup(I_h) - \inf(I_h)} \right) \times q_1 = 0,28$$

$$Q_2 = \left(\frac{n_{-1} - \inf(n_{-1})}{\sup(n_{-1}) - \inf(n_{-1})} \right) \times q_2 = 0,30$$

$$Q_3 = \left(\frac{f - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)} \right) \times q_3 = 0,10$$

$$Q_4 = \left(\frac{\tau_m - \inf(\tau_m)}{\sup(\tau_m) - \inf(\tau_m)} \right) \times q_4 = -0,14$$

$$Q_5 = \left(\frac{S_z - \inf(S_z)}{\sup(S_z) - \inf(S_z)} \right) \times q_5 = -0,17$$



Критерій оптимальності $F = 0,383$

Рис. 2. Фрагмент підпрограми лінійного нормування кваліметричних критеріїв та розрахунку функції мети структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки – сталь 3Х2В8Ф)

Причини, якими можна аналітично пояснити це технологічне вирішення, такі: локалізація контакту інструменту з деталлю за лезового оброблення, а отже, і локальність високої температури в зоні різання є відмінною особливістю точіння порівняно з шліфуванням, що є наслідком короткочасності впливу високої температури на оброблену поверхню. За лезового оброблення висока температура не проникає на велику глибину і не встигає призвести до суттєвих фазово-структурних змін у поверхневому шарі деталі, чим і пояснюються незначні залишкові деформації другого роду. Під час шліфування частка роботи, що переходить в теплоту, становить 88–97 % загальної роботи різання [4]. В зоні контакту шліфувального круга з деталлю, що значно перевищує площу контакту різця з деталлю, біля кожного зерна з металом виникає локальне теплове джерело, залишаючи на поверхні контакту невелику ділянку високої температури, яка зміщується по поверхні зі швидкістю обертання круга.

Під час шліфування загартованої заготовки з цієї сталі з мартенситною структурою в поверхневому шарі під дією високих температур утворюються структури трооститу, які мають менший питомий об'єм, ніж структура мартенситу. Отже, на поверхні заготовки розвиваються залишкові напруження розтягу, а в шарах, що пролягають нижче, – напруження стиску, що урівноважують їх. З іншого боку, за лезового оброблення малопластичної сталі 3X2B8Ф утворюється елементна стружка; в поверхневому шарі формуються залишкові напруження стиску. Під час точіння загартованих матеріалів зі зростанням швидкості різання і збільшенням тепловиділення в поверхневому шарі відбувається відпуск металу, що зменшує його питомий об'єм і викликає додаткові напруження розтягу, внаслідок чого сумарна величина залишкових напружень стиску зменшиться [13].

Враховуючи те, що для пари композит CNB – гартована сталь коефіцієнт тертя набуває значення 0,18–0,2 [14], то умовний кут тертя ψ становитиме приблизно 10° . Тобто у разі різання лезовим інструментом може бути реалізована умова $\bar{S} \rightarrow S_{\text{стиск}}$, за якої умовний кут зсуву матеріалу $\beta \approx 40\text{--}45^\circ$, тобто товщина зрізу фактично дорівнює товщині стружки. Отже, застосування інструменту з CNB потенційно дає змогу реалізувати мінімальну енергоємність оброблення за нульового і навіть негативного переднього кута інструмента. В результаті досягається подвійний ефект оброблення: зменшується силова напруженість процесу різання і з'являється можливість підвищення міцності різального клину інструменту і його зносостійкості.

Якщо порівняти характеристики якості обробленої поверхні під час шліфування і точіння, то можна побачити, що за таким критерієм, як шорсткість, точіння не поступається шліфуванню. Так, під час точіння загартованих сталей різцями інструмента, з CNB можна забезпечити шорсткість $R_a = 0,1$ мкм. За таким критерієм шорсткості, як відносна опорна довжина профілю, шліфування суттєво поступається точінню. Порівняння залишкових напружень у поверхневих шарах обробленої поверхні після шліфування і точіння показує, що лезове оброблення стабільно забезпечує отримання сприятливих напружень стиску I роду, тоді як шліфування – несприятливих напружень розтягу, що негативно позначається на зносостійкості й контактній міцності загартованих деталей [15].

Висновки. Отже, варіант фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 порівняно зі шліфуванням алмазним кругом ACB 125/100 M5-2 оптимальніший за інтегральним кваліметричним показником, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, триботехнічну якість спряжень, корозійну стійкість та параметр забезпечення несучої здатності мастильного шару й отримується як результат формування у процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

1. Ступницький В. В. Структурно-параметрична оптимізація технологічних процесів при забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей / В. В. Ступницький // Східно-Європейський

журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 2/3(68). – С. 9–16. 2. Палей М. М. Технология производства приспособлений пресс-форм и штампов / М. М. Палей. – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с. 3. Каталог режущих инструментов компании Sandvik Coromant. Точение материалов высокой твердости пластинами из CBN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/ru-ru/c-2940-137.pdf>. 4. Васин С. А. Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 448 с. 5. Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначенн: ДСТУ 2823-94. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 32 с. 6. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с. 7. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с. 8. Степнов М. Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М. Н. Степнов. – М.: МАТИ, 2003. – 119 с. 9. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с. 10. Суслов А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. 11. Улиг Г. Г. Коррозия и борьба с ней / Г. Г. Улиг, Р. У. Реву; под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456 с. 12. Ступницький В. В. Узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу / В. В. Ступницький // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. пр. – Донецьк, 2014. – № 2 (48). – С. 109–120. 13. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с. 14. Ступницький В. В. Триботехнічний критерій формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей в машинобудуванні / В. В. Ступницький, Є. М. Махоркін // Наукові нотатки: зб. наук. праць Луцького національного технічного університету. – Луцьк, 2013. – Вип. 42. – С. 305–313. 15. Зубарь В. П. Лезвийная обработка закаленных сталей и чугунов взамен шлифования / В. П. Зубарь, А. Г. Тимчук, М. В. Чопенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 5. – С. 32–38.