

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.2.129025

УДК 621.7.015:539.422.24

К.С. Барандич*, С.П. Вислоух

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МОДЕЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ЇХ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Проблематика. Розглянуто питання технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі завдяки створенню математичної моделі процесу фінішного токарного оброблення, що включає як цільову функцію максимальну продуктивність процесу та множину обмежень по подачі і швидкості різання, допустимим силі та потужності різання, точності оброблення, стійкості інструмента, шорсткості обробленої поверхні, а також по циклічній довговічності деталі та оптимізації режиму різання.

Мета дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення необхідної циклічної довговічності деталі завдяки визначенню раціональних режимів токарного оброблення з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу та розробка відповідних методичних рекомендацій.

Методика реалізації. Поставлена мета дослідження досягається за рахунок створення математичної моделі процесу фінішного токарного оброблення, визначення коефіцієнтів узагальнених характеристик матеріалів класифікаційної групи з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу, подальшої оптимізації моделі методом ковзного допуску та визначення раціональних режимів оброблення.

Результати дослідження. Створено математичну модель фінішного токарного оброблення, що враховує характеристики оброблюваного матеріалу та властивості технологічної оброблюваної системи. Розраховано відносні коефіцієнти узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легированих хромистих сталей. Запропоновано метод багатовимірної оптимізації розробленої математичної моделі.

Висновки. Запропонована методика технологічного забезпечення циклічної довговічності матеріалу деталі на основі математичної моделі процесу фінішного токарного оброблення, що включає як цільову функцію максимальну продуктивність процесу та множину обмежень, дає змогу за вибраним методом нелінійної оптимізації визначити раціональний режим фінішного токарного оброблення.

Ключові слова: технологічне забезпечення; опір втомі; циклічна довговічність; токарне оброблення; багатовимірний статистичний аналіз.

Вступ

Найбільш поширеною причиною виходу з ладу деталей приладів і машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки виникає раптово. Це відбувається в результаті того, що під дією змінних за величиною та напрямком навантажень у поверхневому шарі деталей виникають напруження, що є меншими межі міцності матеріалу. В цьому випадку в макрооб'ємі матеріал деталі деформується пружно. При пружному деформуванні достатньо великого об'єму матеріалу в мікрооб'ємах відбувається локальне знакозмінне мікропластичне деформування. Його багаторазове повторення призводить до зародження мікроскопічних тріщин. Поступовий їх розвиток і об'єднання в магістральну тріщину спричиняє послаблення перерізу і раптовий долом деталі. При експлуатації валів та осей навіть при постійних зовнішніх навантаженнях виникають знакозмінні напруження згину си-

метричного циклу, що можуть призвести до їх втомного руйнування [1, 2].

Із теорії опору матеріалів відомо, що найбільший вплив на опір втомі деталі мають її абсолютні розміри, концентрація напружень, зовнішнє середовище, частота змінних напружень і стан поверхні [1].

Вплив технологічних умов механічного оброблення на параметри якості поверхневого шару та експлуатаційні характеристики матеріалу деталей досліджували багато вчених – А.Г. Суслов, В.Ф. Без'язичний, Т.Д. Кожина, А.М. Сулима, С.С. Сілін, Е.В. Рижов, В.П. Федоров, С.С. Філін, М.А. Єлизаветін, М.І. Євстигнєєв, С.А. Урядов, А.Л. Водолагін, Г.В. Карпенко, В.І. Марчук, А. Явіді, А. Пранік, А.Р. Діксіт, Ч. Чаттопадхья, М.С. Удін, Ю. Донг, А.К. Басак та ін.

На сьогодні спостерігається тенденція заміни шліфування фінішною обробкою поверхонь точінням при виготовленні відповідальних деталей. Тому виникає необхідність розробки

* corresponding author: barandichk@ukr.net

методик, що дають змогу забезпечити необхідний рівень якості поверхневого шару таких деталей і надійність їх експлуатації. Таким чином, актуальним є керування технологічною спадковістю деталі, основним носієм якої є поверхневий шар деталі, при її токарному обробленні для забезпечення її необхідної циклічної довговічності.

Постановка задачі

Метою роботи є технологічне забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі через визначення оптимальних режимів її токарного оброблення. Для досягнення цієї мети необхідно розробити математичну модель процесу фінішного токарного оброблення, що складається з цільової функції та системи обмежень, які дають змогу забезпечити необхідну циклічну довговічність деталі.

Реалізація поставленої задачі

Оптимізація технологічних умов оброблення деталей [3] включає розв'язання технологічних, економічних, конструкційних та організаційних задач. Критеріями оптимальності є:

- критерій мінімальної технологічної собівартості виконання операції;
- критерій максимальної продуктивності процесу оброблення;
- критерій максимальної стійкості різального інструмента тощо.

При розв'язанні поставленої задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей як критерій оптимальності вибрано максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення [4]:

$$f = n \cdot S, \quad (1)$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв, S – поздовжня подача, мм/об.

З урахуванням того що $n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$, отримуємо таку критеріальну залежність:

$$f(S, V) = \frac{1000 \cdot S \cdot V}{\pi \cdot D}.$$

Визначення оптимальних значень подачі та швидкості різання здійснюється з області допустимих рішень. При розв'язанні вказаної задачі ця область задається множиною їх обмежень на процес токарного оброблення.

1. Обмеження по подачі:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (2)$$

де S_{\min} і S_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне допустимі значення поздовжньої подачі, об/хв.

2. Обмеження по швидкості різання:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, \quad (3)$$

$$V_{\min} = \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000}, \quad V_{\max} = \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000},$$

де D_0 – діаметр заготовки до обробки, мм; V_{\min} , V_{\max} – мінімальна та максимальна швидкість різання, м/хв; n_{\min} , n_{\max} – мінімальна та максимальна частота обертання шпинделя, об/хв.

3. Обмеження по допустимій силі різання:

$$P_x = 10 C_{P_x} h^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} V^{n_{P_x}} K_{P_x} \leq P_{\max \text{ о.з.}}, \quad (4)$$

де P_x – осьова складова сили різання, Н; $P_{\max \text{ о.з.}}$ – максимальне осьове зусилля верстата, Н; C_{P_x} – стала; x_{P_x} , y_{P_x} , n_{P_x} – показники степеня; K_{P_x} – поправковий коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів K_{M_p} , $K_{\phi_{P_x}}$, $K_{\gamma_{P_x}}$, $K_{\lambda_{P_x}}$, $K_{r_{P_x}}$. При цьому $K_{M_p} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^n$, де σ_B – тимчасовий опір (межа міцності) оброблюваного матеріалу, МПа, n – показник степеня.

Числові значення сталої C_{P_x} , показників степеня x_{P_x} , y_{P_x} , n_{P_x} і складових поправкового коефіцієнта K_{P_x} наведені в [5, 6].

4. Обмеження по допустимій потужності різання:

$$N_{\text{різ}} \leq N_{\text{шп}}, \quad (5)$$

де $N_{\text{різ}}$ – ефективна потужність, що необхідна для різання, кВт; $N_{\text{шп}}$ – потужність, яку розвиває верстат на шпинделі, кВт:

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{дв}} \eta, \quad (6)$$

де $N_{\text{дв}}$ – потужність двигуна головного приводу верстата, кВт; η – коефіцієнт корисної дії головного приводу верстата.

Згідно з [5, 7, 8] ефективна потужність, що необхідна для токарного оброблення, розраховується за формулою

$$N_{\text{різ}} = \frac{P_z v}{1000 \cdot 60}, \quad (7)$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання, що визначається залежністю

$$P_z = 10 C_{P_z} h^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K_{P_z}, \quad (8)$$

де C_{P_z} – стала; x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} – показники степеня; K_{P_z} – поправковий коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів K_{M_p} , $K_{\phi P_z}$, $K_{\gamma P_z}$, $K_{\lambda P_z}$, $K_{r P_z}$.

Числові значення сталої C_{P_z} , показників степеня x_{P_z} , y_{P_z} , n_{P_z} та складових поправкового коефіцієнта K_{P_z} наведені в [5, 7, 8].

Тоді з урахуванням формул (6)–(8) нерівність (5) набуде такого вигляду:

$$N_{\text{дв}} \eta \geq \frac{10 C_{P_z} h^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K_{P_z}}{1000 \cdot 60}. \quad (9)$$

5. Обмеження по точності оброблення:

$$\Delta_{\Sigma} \leq 0,5 \cdot TD,$$

де Δ_{Σ} – сумарна похибка оброблення, мкм; TD – величина допуску, що відповідає необхідному квалітету точності розміру, мкм [9].

Сумарна похибка включає такі складові: Δ_y – похибка коливання пружних деформацій технологічної системи під впливом нестабільності навантажень (сил різання, сил інерції тощо), що діють у системі змінної жорсткості; Δ_{ϵ_y} – похибка встановлення заготовки в пристосування; Δ_n – похибка налагодження технологічної системи на необхідний розмір; Δ_i – похибка розмірного зносу різального інструмента. Отже,

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_y + \Delta_{\epsilon_y} + \Delta_n + \Delta_i. \quad (10)$$

При цьому

$$\Delta_y = y_{\text{max}} - y_{\text{min}} = W_{\text{max}} P_{\text{max}} - W_{\text{min}} P_{\text{min}},$$

де W_{max} , W_{min} – відповідно найбільша і найменша піддатливість системи, що наведена в документації на використовуване обладнання, мкм/Н; P_{max} , P_{min} – максимальне і мінімальне значення складової сили різання, що збігаються з напрямком розміру, який витримується, оброблюваної поверхні та є граничними зна-

ченнями радіальної складової сили різання, яка визначається за формулою

$$P_y = 10 C_{P_y} h^{x_{P_y}} s^{y_{P_y}} v^{n_{P_y}} K_{P_y},$$

де C_{P_y} – стала; x_{P_y} , y_{P_y} , n_{P_y} – показники степеня; K_{P_y} – поправковий коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів K_{M_p} , $K_{\phi P_y}$, $K_{\gamma P_y}$, $K_{\lambda P_y}$, $K_{r P_y}$.

Числові значення сталої C_{P_y} , показників степеня x_{P_y} , y_{P_y} , n_{P_y} і складових поправкового коефіцієнта K_{P_y} наведені в [5, 7, 8].

Значення похибки встановлення заготовки в пристосуванні Δ_{ϵ_y} залежить від використуваного оснащення, виду заготовки та її розмірів, а також від похибки настроювання технологічної системи на розмір, який витримується, Δ_n . Значення вказаних похибок наведено в [10].

Складова сумарної похибки, що виникає в результаті розмірного зносу різального інструмента, розраховується за формулою

$$\Delta_i = \frac{L_n}{1000} u_0,$$

де L_n – довжина шляху різання для партії деталей; u_0 – відносний розмірний знос різця для заданих умов виконання операції, його орієнтовні значення наведені в [10, 11].

Довжина шляху різання при точінні однієї заготовки визначається як $L_d = \frac{\pi D l_d}{1000 s}$, де D – діаметр оброблюваної поверхні, мм; l_d – довжина оброблюваної поверхні, мм; s – подача, мм/об. Довжина шляху різання L_N для партії заготовок N , що оброблюються в період між піднастроюваннями верстата, становить $L_N = L_d N$. З урахуванням інтенсивного початкового зносу розрахункова довжина різання збільшується на $L_n = 1000$ мм, отже, $L_n = L_N + L_n$. Звідси

$$\Delta_i = \frac{\left(\frac{\pi D l_d N}{1000 s} + L_n \right) \cdot u_0}{1000}.$$

5. Обмеження по стійкості інструмента:

$$T \geq T_{\text{необ}},$$

де $T_{\text{необ}}$ – необхідний період стійкості інструмента, хв.

Період стійкості визначається за формулою [5]

$$T = \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}, \quad (11)$$

де C_V – стала, x , y , m – показники степеня, K_V – поправковий коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу заготовки K_{MV} , стану поверхневого шару $K_{пV}$ та матеріалу різального інструмента K_{iV} :

$$K_V = K_{MV} K_{пV} K_{iV}. \quad (12)$$

При цьому

$$K_{MV} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_V}, \quad (13)$$

де K_r – коефіцієнт, що враховує вид оброблюваного матеріалу; n_V – показник степеня.

Числові значення сталих, коефіцієнтів та показників степеня із формул (11)–(13) подані в [5].

1. Обмеження по шорсткості:

$$Ra \leq Ra_{\text{необ}}, \quad (14)$$

де $Ra_{\text{необ}}$ – необхідна величина шорсткості поверхні, що вказана на кресленні деталі, мкм; Ra – величина шорсткості поверхні після її оброблення.

Середня висота профілю шорсткості в загальному випадку для всіх методів механічного оброблення визначається залежністю [10, 12, 13]

$$Ra = 0,2 \cdot R_Z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

де h_1 – складова профілю шорсткості, яка обумовлена геометрією та кінематикою переміщення робочої частини інструмента; h_2 – складова профілю шорсткості, яка залежить від коливань інструмента відносно оброблюваної поверхні; h_3 – складова профілю шорсткості, яка обумовлена пластичною деформацією в зоні контакту інструмента і заготовки; h_4 – складова профілю шорсткості, яка визначається шорсткістю робочої частини інструмента.

2. Обмеження по циклічній довговічності:

$$N_{\text{необ}} \leq N_{\text{розр}}.$$

Відповідно до наведених у [14] експериментальних досліджень та обробки їх результатів отримано математичну залежність кількості циклів до руйнування матеріалу деталі від режимів її токарного оброблення та експлуатаційного напруження для зразків, що виготовлені зі сталі 40X.

З урахуванням цього обмеження по циклічній довговічності матиме такий вигляд:

$$N_{\text{необ}} \leq e^{14,437+0,0048V+13,006S-13,19\sigma+0,002VS-0,002V\sigma-5,941S\sigma+0,0000004V^2+2,929S^2+3,013\sigma^2}. \quad (15)$$

Таким чином, сформована математична модель процесу токарного оброблення представляється залежностями (1)–(4), (9)–(11), (14), (15), що дає змогу розв'язати задачу технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі визначенням оптимальних режимів її різання.

Створення математичної залежності циклічної довговічності для кожного конструкційного матеріалу від режимів різання та експлуатаційних напружень, що є одним із основних обмежень на технологічний процес токарного оброблення, вимагає значних затрат часу, матеріальних та енергетичних ресурсів.

Тому для отримання математичних моделей циклічної довговічності деталей, що виготовлені із конструкційних матеріалів групи легованих хромистих сталей, до якої належить сталь 40X, застосована методика врахування відмінностей їх властивостей (фізико-механічних характеристик і хімічного складу) від сталі 40X [15, 16]. При цьому початковими даними для виконання розрахунків використано інформацію про хімічний склад та фізико-механічні характеристики матеріалів цієї класифікаційної групи.

Методика врахування відмінностей конструкційного матеріалу від сталі 40X базується на стисненні масивів інформації про властивості матеріалів класифікаційної групи [16] завдяки використанню багатовимірного факторного аналізу. Таким чином, отримано латентні змінні, які з необхідною інформативністю характеризують кожен матеріал цієї групи. Як критерій вибору кількості використовуваних латентних змінних взято власні значення кореляційної матриці початкових даних, що перевищують 1.

Із табл. 1, де наведено значення власних векторів кореляційної матриці початкових даних і відповідні їм індивідуальні та накопичені дисперсії, видно, що для матеріалів групи

Таблиця 1. Власні значення кореляційної матриці початкових даних і відповідні їм індивідуальні та накопичені дисперсії характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

№ ком-понет	Початкові власні значення кореляційної матриці			Відібрані власні значення кореляційної матриці		
	Значення	Дисперсія кожної компоненти, %	Накопичена дисперсія, %	Значення	Дисперсія кожної компоненти, %	Накопичена дисперсія, %
1	6,200	44,282	44,282	6,200	44,282	44,282
2	3,968	28,343	72,625	3,968	28,343	72,625
3	1,834	13,102	85,728	1,834	13,102	85,728
4	1,019	7,280	93,008	1,019	7,280	93,008
5	0,511	3,649	96,657	–	–	–
6	0,306	2,187	98,844	–	–	–
7	0,089	0,636	99,480	–	–	–
8	0,057	0,407	99,886	–	–	–
9	0,016	0,114	100,000	–	–	–
10	3,319E-16	2,370E-15	100,000	–	–	–
11	3,336E-17	2,383E-16	100,000	–	–	–
12	1,869E-17	1,335E-16	100,000	–	–	–
13	-2,379E-17	-1,700E-16	100,000	–	–	–
14	-2,539E-16	-1,814E-15	100,000	–	–	–

Таблиця 2. Факторні навантаження на компоненти для матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Характеристики матеріалів	Факторні навантаження			
	1	2	3	4
E , МПа	-0,367	0,810	0,037	0,421
G , МПа	-0,536	0,284	0,692	0,330
ρ , кг/м ³	0,006	-0,690	0,262	0,487
σ_T , МПа	0,959	-0,122	0,122	0,178
σ_B , МПа	0,952	-0,144	0,043	0,207
δ , %	-0,883	-0,351	0,128	0,037
ψ , %	-0,455	-0,433	0,605	-0,396
КСУ, кДж/м ²	-0,677	-0,553	0,459	0,005
НВ	0,950	0,016	0,146	-0,145
C, %	0,640	0,307	0,491	-0,431
Mn, %	0,603	0,306	0,588	0,037
S, %	-0,189	0,964	0,128	-0,013
P, %	-0,189	0,964	0,128	-0,013
Cr, %	0,871	-0,235	0,189	0,233

конструкційних легованих хромистих сталей чотири латентні змінні враховують 93,008 % інформації, яка міститься в масивах початкових даних.

Значення факторних навантажень на компоненти для класифікаційної групи конструкційних легованих хромистих сталей (табл. 2)

Таблиця 3. Результати стиснення початкової інформації про хімічний склад та фізико-механічні характеристики матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Матеріал	Латентні фактори			
	1	2	3	4
15X	-1,35222	0,33743	-0,68478	0,28964
15XA	-0,93546	-1,49985	-1,54586	-0,43188
20X	-0,63406	0,88406	-0,51765	1,03803
30X	-0,48851	0,40759	0,46798	-0,3087
30XPA	1,9725	-1,06507	-0,62992	1,36681
35X	-0,25526	0,30973	0,93282	0,79282
38XA	-0,2146	-1,62724	1,61836	-0,87978
40X	0,12051	0,53806	1,13993	0,7812
45X	0,74805	0,69949	-0,10406	-1,61514
50X	1,03906	1,01582	-0,67683	-1,033

дають змогу встановити латентні фактори за значеннями характеристик матеріалів, що входять до цієї класифікаційної групи.

На основі використання наведених у табл. 2 факторних навантажень отримано латентні змінні для матеріалів класифікаційної групи, які подано в табл. 3.

Це дало можливість відповідно до методики порівняння досліджуваних об'єктів за їх параметрами, що наведена в [16], визначити коефіцієнти узагальнених характеристик K_y , які

враховують хімічний склад та фізико-механічні властивості кожного матеріалу цієї групи.

Значення розрахованих коефіцієнтів узагальнених характеристик K_y для конструкційних матеріалів класифікаційної групи легованих хромистих сталей наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Коефіцієнти узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Матеріал	K_y
15X	1,155236
15XA	1,045567
20X	1,129624
30X	1,090127
30XPA	0,927003
35X	1,234588
38XA	1,050261
40X	1,198004
45X	0,790049
50X	0,738517

У зв'язку з тим що експериментальні дослідження виконувалися над зразками зі сталі 40X, який у цьому випадку можна вважати еталонним, відносні коефіцієнти узагальнених характеристик конструкційних легованих хромистих сталей K_B матимуть значення, наведені в табл. 5.

Таблиця 5. Відносні коефіцієнти узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Марка сталі	K_B
15X	0,964301
15XA	0,872758
20X	0,942922
30X	0,909953
30XPA	0,77379
35X	1,030537
38XA	0,876676
40X	1
45X	0,659471
50X	0,616456

Відповідно до визначених відносних коефіцієнтів математична модель циклічної довговічності залежно від режимів токарного оброблення для будь-якого матеріалу класифікаційної групи легованих хромистих сталей матиме такий вигляд:

$$N(S, V, \sigma) = K_B \cdot e^k, \quad (16)$$

де

$$k = 14,437 + 0,0048V + 13,006S - 13,19\sigma + 0,002VS - 0,002V\sigma - 5,941S\sigma + 0,0000004V^2 + 2,929S^2 + 3,013\sigma^2.$$

З урахуванням залежності (16) математична модель процесу токарного оброблення деталей для будь-якого матеріалу групи конструкційних легованих хромистих сталей має вигляд $\max f(S, V)$ при

$$\begin{aligned} S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000} &\leq V \leq \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000}; \\ P_{\max \text{ о.з.}} &\geq P_x = 10C_{P_x} h^{x_{P_x}} S^{y_{P_x}} V^{n_{P_x}} K_{P_x}; \\ N_{\text{дв}} \eta &\geq \frac{10C_{P_z} h^{x_{P_z}} S^{y_{P_z}} V^{n_{P_z}} K_{P_z}}{1000 \cdot 60}; \\ 0,5 \cdot TD &\geq \Delta_{\Sigma}; \\ T &\leq \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}; \\ Ra_{\text{необ}} &\geq Ra_{\text{розр}}; \\ N_{\text{необ}} &\leq K_B \cdot N_{\text{розр}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для технологічного забезпечення процесу фінішного токарного оброблення деталі, згідно з поставленою в роботі задачею, потрібно визначити оптимальні режими, що забезпечують необхідне значення циклічної довговічності матеріалу деталі за максимальної продуктивності.

У загальному вигляді ця задача оптимізації є багатовимірною задачею математичного програмування, де цільова функція та обмеження є нелінійними відносно оптимізуємих змінних.

Аналіз методів нелінійного програмування [17, 18] показав, що для розв'язання такої задачі доцільно використовувати метод ковзного допуску.

Метод ковзного допуску належить до методів, що дають змогу розв'язати задачу нелінійного програмування, яка формулюється таким чином: визначити вектор оптимізуємих змінних X , що надає максимальне значення цільовій функції $f(X)$, $X \in E^m$ за таких припущень:

$$h_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$g_j(X) \geq 0, j = n + 1, n + 2, \dots, l,$$

де функції $f(X)$, $h(X)$ і $g(X)$ можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Реалізація запропонованої методики технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі оптимізацією режимів різання з використанням наведеної математичної моделі (17) та вибраного методу оптимізації виконана на прикладі деталі “Вал”, що працює в складних умовах знакозмінних навантажень.

Початковими даними при розв’язанні цієї задачі були фактичні значення характеристик складових технологічної обробної системи, а також умови експлуатації деталі. Для визначення локалізації та величини напружень матеріалу деталі виконували комп’ютерне моделювання її пружно-деформованого стану, максимальне експлуатаційне напруження становить 400 МПа [19].

Розв’язок оптимізаційної задачі на прикладі деталі типу “Вал” дали змогу визначити раціональний режим різання ($S = 0,138$ мм/об; $V = 187,6$ мм/хв; $h = 0,1$ мм), який забезпечує циклічну довговічність деталі не менше $N = 16 \cdot 10^4$ циклів, що більше заданого розробниками ресурсу роботи деталі при її експлуатації, та максимальну продуктивність виготовлення (за умови мінімізації часу оброблення).

Висновки

Розв’язання задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі “Вал”, що виготовлена зі сталі 40Х, із застосуванням математичного моделювання процесу її токарного оброблення та визначення

оптимального режиму фінішного точіння, який забезпечує максимальну продуктивність, показало ефективність запропонованої методики.

Створена математична модель процесу токарного оброблення, яка включає як цільову функцію максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення та множину обмежень на вихідні параметри процесу різання, характеристики використовуваного обладнання й інструмента і передусім циклічну довговічність матеріалу деталі, дає змогу розв’язати задачу забезпечення її необхідної циклічної довговічності.

Наведений приклад урахування відмінностей характеристик кожного конструкційного матеріалу групи легованих хромистих сталей від відповідних параметрів сталі 40Х показав можливість технологічного забезпечення циклічної довговічності будь-якого матеріалу класифікаційної групи на основі використання математичної моделі процесу фінішного токарного оброблення деталей зі сталі 40Х.

Запропонований метод розв’язання багатовимірної задачі математичного програмування дає змогу ефективно розв’язати задачу оптимізації режимів різання за наявності множини обмежень на характеристики складових технологічної обробної системи.

Подальша робота буде спрямована на створення методики технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі та програмного продукту для зручного її прикладного використання. Також плануються дослідження в напрямі технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик деталей за рахунок інших способів оброблення при використанні розробленої методики врахування відмінностей властивостей конструкційних матеріалів.

References

- [1] I.A. Birger *et al.*, *Machine Part Strength Calculation*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1993.
- [2] N.A. Mahutov, *Deformation Criteria for Destruction and Strength Calculation of Design Elements*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1981.
- [3] V.F. Bezyazhnyj *et al.*, *Calculation of Cutting Conditions. Textbook*. Rybinsk, Russia: RGATA, 2009.
- [4] Yu.V. Petrakov and A.K. Amin, “Optimization Module of stepped shafts sharpening process on CNC machines”, *Progressivnye Tehnologii i Sistemy Mashinostroenija*, no. 2, pp. 154–161, 2008.
- [5] *Guide for Technologist-Mechanician*, vol. 2, A.M. Dalskij *et al.*, eds. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 2003.
- [6] *Guide for the Technologist. Processing of Metals by Cutting*, A.A. Panov, Ed. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1988.
- [7] *General Machine-Building Standards for Cutting Condition Duration for Normalizing Work Performed on Universal and Multipurpose Machines with Numerical Program Control*, part 2, *Cutting Condition Standards*. Moscow, Russia: Ehkonomika, 1990.

- [8] A.D. Loktev *et al.*, *General Machine-Building Standards for the Cutting Condition Duration*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1991.
- [9] A.B. Romanov *et al.*, *Tables and Albums for Adjustments and Allowances*. St. Petersburg, Russia: Politehnika, 2005.
- [10] *Guide for Technologist-Mechanician*, vol. 1, A.M. Dalskij *et al.*, eds. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 2003.
- [11] V.I. Baranchikov *et al.*, *Progressive Cutting Tools and Metal Cutting Conditions*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1990.
- [12] A.G. Suslov, *Quality of the Surface Layer of Machine Parts*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 2000.
- [13] V.F. Bezyazychnyj, "Calculation of the machined surface roughness height during turning", *Obrabotka Vysokoprochnykh Stalej i Splavov Instrumentami iz Sverhtverdykh Sinteticheskikh Materialov*, no. 1, p. 162, 1978.
- [14] C. Barandych *et al.*, "Lathe turning mode optimisation for parts working under conditions of cyclic loading", *Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 53–60, 2016.
- [15] K.S. Barandych *et al.*, "The choice of rational conditions for the processing of structural materials", *Protsey Mekhanichnoi Obrobky v Mashynobuduvanni*, no. 10, pp. 64–72, 2011.
- [16] K.S. Barandych and S.P. Vysloukh, "Method of fatigue life determination of parts' material, working under variable loads", *Visnyk Zhytomyrskoho Derzhavnoho Tekhnolohichnoho Universytetu. Ser. Tekhnichni Nauky*, no. 4, pp. 30–37, 2015.
- [17] G.Ju. Jakobs *et al.*, *Optimization of Cutting Conditions. Parameterization of Cutting Methods Using Technological Optimization*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1981.
- [18] V.S. Antonyuk *et al.*, "Optimization of technological parameters of the hardening coatings' formation process", *Tehnologicheskie Sistemy*, no. 4, pp. 44–48, 2003.
- [19] C.S. Barandych and S.P. Vysloukh, "Generating finite-element model of the shaft and solution of boundary value problem of stress-strain state", *Zbirnyk Naukovykh Prats Poltavskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu im. Yu. Kondratiuka. Ser. Haluzeve Mashynobuduvannia, Budivnytstvo*, no. 2, pp. 228–232, 2014.

К.С. Барандич, С.П. Выслоух

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИХ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Проблематика. Рассмотрены вопросы технологического обеспечения необходимой циклической долговечности материала детали путем создания математической модели процесса финишной токарной обработки, включающей в качестве целевой функции максимальную производительность процесса и систему ограничений по подаче и скорости резания, допустимым силе и мощности резания, точности обработки, устойчивости инструмента, шероховатости обработанной поверхности, а также по циклической долговечности детали и оптимизации режима резания.

Цель исследования. Целью работы является технологическое обеспечение необходимой циклической долговечности детали путем определения рациональных режимов токарной обработки с учетом свойств обрабатываемого материала и разработка соответствующих методических рекомендаций.

Методика реализации. Поставленная цель исследования достигается за счет создания математической модели процесса финишной токарной обработки, определения коэффициентов обобщенных характеристик материалов классификационной группы с учетом свойств обрабатываемого материала, дальнейшей оптимизации модели методом скользящего допуска и определения рациональных режимов обработки.

Результаты исследования. Создана математическая модель финишной токарной обработки, учитывающая характеристики обрабатываемого материала и свойства технологической обрабатываемой системы. Рассчитаны относительные коэффициенты обобщенных характеристик материалов группы конструкционных легированных хромистых сталей. Предложен метод многомерной оптимизации разработанной математической модели.

Выводы. Предложенная методика технологического обеспечения циклической долговечности материала детали на основе математической модели процесса финишной токарной обработки, включающей в качестве целевой функции максимальную производительность процесса и систему ограничений, позволяет по выбранному методу нелинейной оптимизации определить рациональный режим финишной токарной обработки.

Ключевые слова: технологическое обеспечение; сопротивление усталости; циклическая долговечность; токарная обработка; многомерный статистический анализ.

K.S. Barandych, S.P. Vysloukh

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF PARTS' FATIGUE LIFE BY MODELING THEIR TURNING PROCESS

Background. The issue of technological support of the required part's material fatigue life by creating a mathematical model of the finishing turning process is considered. This model includes, as a target function, the maximum process productivity and the set of feed constraints and cutting speeds, permissible force and cutting power, machining precision, tool stability, surface roughness, part fatigue life, and cutting condition optimization.

Objective. The aim of the paper is to provide technological support for the required part fatigue life by determining the rational cutting conditions, taking into account the properties of the processed material, and to develop appropriate methodological recommendations.

Methods. The objective of the research is achieved by creating a mathematical model of the finishing turning process, determining the coefficients of the generalized materials' characteristics of the classification group taking into account the properties of the processed material, further model optimization by the method of sliding admission and the definition of rational cutting conditions.

Results. The mathematical model of the finishing turning process, which takes into account the characteristics of the processed material and the properties of the technological processable system, was created. Relative coefficients of the materials' generalized characteristics of the structural alloyed chromium steels group are calculated. A multivariate optimization method of the developed mathematical model is proposed.

Conclusions. The proposed methodological recommendation of technological support of a part's material fatigue life based on a mathematical model of the finishing turning process, which includes the maximum process productivity and set of restrictions as the target function, which allows determining the rational cutting condition by the chosen method of nonlinear optimization.

Keywords: technological support; fatigue strength; fatigue life; turning process; multidimensional statistical analysis.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
12 березня 2018 року

Прийнята до публікації
29 березня 2018 року