

4. Перспективные суда и технические средства для нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.vympel.ru/ru/publikaczii/10-publikaczii/110-perspektivnye-suda-i-texnicheskie-sredstva-dlya-neftegazovoj-otrasli>.
5. White, Frank M. Fluid mechanics [Text] / Frank M. White; 7th ed / M. White Frank. – Published by McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies. – New York, NY 10020. Copyright © by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved, 2011. – 863 p.
6. Katz, D. L. Handbook of natural gas engineering [Text] / D. L. Katz, D. Cornell, R. Kobayashi and others. – McGraw-Hill Book Company, inc. New York, Toronto, London, 1959. – 712 p.
7. Bendlken, K. H. The Dynamic Two-Fluid Model OLGA: Theory and Application [Text] / K. H. Bendlken, D. Maine, R. Moe, S. Nuland. – Inst. for Energy Technology. SPE 19451 SPE Production Engineering, 1991. – P. 171–180.
8. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л: Химия, 1982. – 592 с.
9. Загорученко, В. А. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метан [Текст] / В. А. Загорученко, А. М. Журавлев. – М.: Издательство комитета стандартов мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1969. – 238 с.
10. Joule–Thomson effect [Electronic resource] / Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Joule%E2%80%93Thomson_effect.
11. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте [Текст] / Ф. Г. Гайнуллин, А. М. Гриценко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский. – М.: Недра, 1986. – 255 с.

В статті описана методика багатокритеріальної оптимізації структури та параметрів технологічних операцій і переходів залежно від особливостей функціонування виробу у складі машини чи технологічної системи та забезпечення виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу його роботи. Наведено методіку та алгоритм формування адитивного критерію оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, функціонально-орієнтована технологія, критерій оптимізації, життєвий цикл виробу

В статье описана методика многокритериальной оптимизации структуры и параметров технологических операций и переходов в зависимости от особенностей функционирования изделия в составе машины или технологической системы и обеспечения выполнения заданного, необходимого или предельного эксплуатационного потенциала его работы. Приведена методика и алгоритм формирования аддитивного критерия оптимизации функционально-ориентированного технологического процесса

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, функционально-ориентированная технология, критерии оптимизации, жизненный цикл изделия

УДК 621.9(075.8)

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В. В. Ступницький

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра технології машинобудування
Національний університет «Львівська політехніка»,
Інститут інженерної механіки і транспорту
вул. Професорська, 2, м. Львів, Україна, 79013
E-mail: stupn@i.ua

1. Вступ

Об'єктивні умови розвитку ринкової економіки в сучасних умовах глобалізованого суспільства визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва продукції машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом всього

життєвого циклу продукції. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами, ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат розширення та вдосконалення експлуатаційних та сервісних властивостей виробів) підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів

його життєвого циклу. Структурність якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [1].

Таким чином, впровадження комплексної системи управління життєвим циклом виробу (Product Lifecycle Management – PLM) вимагає проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва, тобто врахування вже на стадії технологічної підготовки виробництва не тільки параметрів точності розмірів та шорсткості оброблюваних поверхонь, але й системного комплексу кваліметричних показників, що матимуть суттєвий вплив на забезпечення експлуатаційних, ремонтних, утилізаційних та інших функціональних властивостей виробів [2 – 5].

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Як зазначається у роботах [6 – 8], при параметричній оптимізації технологічних процесів і, зокрема, при розрахунку режимів різання, переважно використовують максимальну продуктивність або мінімальну собівартість технологічної операції як оціночну функцію.

Проте, як показав проведений аналіз, в окремих випадках доцільніше використати інші оціночні функції. Так, при технологічному забезпеченні заданих характеристик якості поверхні (макро- і мікрогеометрії, мікротвердості, залишкових напружень і структури поверхневого шару) ефективнішим критерієм оптимальності слід вважати функціональну залежність експлуатаційних властивостей об'єкту виробництва від технологічних чинників оброблення. Це викликано тим, що на характеристики якості поверхні впливають не лише швидкість різання і подача, які визначають критерій оптимальності за технологічною собівартістю, але й ряд інших чинників (геометрія і матеріал інструменту, використання різних технологічних середовищ тощо).

Так, у роботі [8] технологічну спадковість запропоновано враховувати не через характеристики якості поверхні, а через деякі комплексні показники, що найбільшою мірою впливають на даний процес оброблення. У цій роботі в якості функції мети при виборі технологічного структурно-параметричного рішення використовувався безрозмірний комплекс, $\Delta = R_{\max} / \rho \cdot b^{1/v}$, де ρ , b , v – характеристики шорсткості відповідно радіус виступів і параметри кривої Аббота.

Методологія функціонально-орієнтованого проектування основана на системі паралельного інжинірингу -САРЕ (Concurrent Art-to-Product Environment - система підтримки паралельного проектування (Concurrent engineering)) з параметричними зв'язками між елементами моделей, вузлів та програмними модулями [1, 3, 9]. Багат шаровість цифрової моделі виробу та координаційні функції САРЕ-системи дозволяють суттєво скоротити цикл створення виробу, підвищити технічний рівень проектів, уникнути нестиковок і помилок внаслідок взаємозв'язку та контрольованості інформації на всіх стадіях технологічного проектування. Тобто, засобами паралельного інжинірингу можна реалізувати рекурентний

та ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів автоматизованої технологічної підготовки виробництва: 3D моделювання виробів (САД-система), імітації умов їх майбутньої експлуатації (САЕ-система), проектування структури та параметрів технології їх виготовлення (САРР-система) та програмування механічного оброблення на верстаках з ЧПК (САМ-система). У цьому ланцюгу не вистачає лише системи, що формалізує взаємозв'язок між технологією формоутворення виробів з потенційними та критичними умовами їх майбутньої експлуатації.

Основою впровадження функціонально-орієнтованих технологій для ефективної реалізації методології PLM у машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання автоматизованої технологічної системи формоутворення виробів - САФ-системи (Computer Aided Forming) [2, 3].

В основі цієї системи покладено аналіз імітаційних реологічних моделей окремих технологічних переходів і комплекс функціональних модусів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, термічно-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Наповнення репозиторія даних шляхом вдосконалення цифрового макету виробу відбувається вже на стадії технологічної підготовки виробництва, а не в результаті проведення трудомістких експериментальних досліджень. Таким чином, результати роботи САФ-системи повинні бути використані для встановлення формалізованої залежності комплексу експлуатаційних властивостей виробу від структури та параметрів технологічного процесу їх виготовлення [3].

Отже, головною особливістю функціонально-орієнтованого проектування є те, що функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри технологічного процесу є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу при дотриманні заданих параметрів точності, нормативного ресурсу його роботи а також організаційних та техніко-економічних обмежень і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій.

3. Мета і завдання дослідження

Метою даної наукової публікації є опис методики структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу механічного оброблення виробів, сформованого на основі функціонально-орієнтованого принципу, що базується на прогностичних результатах аналізу реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану деталі в процесі її формоутворення. Формалізація рекурентних зв'язків між структурно-параметричними результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробів дасть змогу забезпечити оптимальний комплекс їх кваліметричних показників засобами паралельного інжинірингу.

У статті поставлено завдання: розроблення алгоритму вирішення задачі багатокритеріальної опти-

мізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

4. Методика та алгоритм структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу

Серед найбільш важливих характеристик функціональної ефективності $\{F_i\}$ слід виділити такі локальні критерії ефективності функціонування певної j -ї поверхні $j=1, J$ і-ї деталі, як зносостійкість (q_{ij1}); триботехнічна якість спряжень (q_{ij2}); втомна міцність (q_{ij3}); корозійна стійкість (q_{ij4}); мастильна утримуюча здатність (q_{ij5}).

Кожен кортеж вхідних даних для відповідного варіанту структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу відображається у N -мірному просторі зважених показників якості, за якими оцінюється відповідність виробу поставленим вимогам:

$$F_{opt} \{q_1, q_2, \dots, q_n, \dots, q_N\} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Враховуючи мінімаксий характер впливу окремих локальних критеріїв на експлуатаційні властивості об'єкту виробництва (тобто, наприклад, позитивною функціональною ознакою є набуття виробом максимальної зносостійкості ($q_{ij1} \rightarrow \max$) або мінімального коефіцієнту тертя, що забезпечує триботехнічну якість спряжень ($q_{ij2} \rightarrow \min$)), для кожного локального критерію слід визначити значення супремуму та інфімуму зі всієї множини допустимих значень окремого операнда (локального критерію) [10].

Принцип їх визначення можна виразити формулою:

$$q_n^{\max} = \sup \{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\}, \quad (2)$$

де \sup (супремум) – операнд виділення найкращого (з експлуатаційної точки зору) значення кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j=1, J$) і-ї деталі за n -ю ознакою;

$$q_n^{\min} = \inf \{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\}, \quad (3)$$

де \inf (інфімум) – операнд виділення найгіршого значення кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j=1, J$) і-ї деталі за n -ю ознакою.

Необхідність встановлення єдиного комплексного критерію F_{Σ} технічного рівня виробу вимагає розроблення методики та алгоритму вирішення багатокритеріальної оцінки якості виробу. Найбільш ефективним математичним інструментарієм можна вважати метод звертання множини показників в єдиний, еквівалентний за умовами комутативності та безперервної диференціації в просторі показників $\{F_i\}$ по всіх показниках функціональної ефективності $\{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\}$ кожної j -ї поверхні $j=1, J$ і-ї деталі. В даному випадку параметричною формою оператора звертання можна вважати адитивну нормувальну форму виду [1]:

$$F_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot q_n \neq 0 \forall n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де $\alpha_n (\forall n = \overline{1, N})$ - матриця-стовбець вагових коефіцієнтів кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j=1, J$) і-ї деталі.

Узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу складається з таких етапів:

1. Етап інтерактивного внесення інформації (вхідних даних) в систему.

2. Етап моделювання виробу (система CAD), його попереднього інженерного аналізу (система CAE) та формування вихідного варіанту структури і параметрів технологічного процесу (система CAPP) [11].

3. Етап моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САЕ-системі [2].

4. Етап розрахунку локальних критеріїв:

- інтенсивності зношування функціональних поверхонь в умовах функціонування трибоспряжень в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь [12 – 15];

- коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі в потенційних або критичних умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь [13, 15];

- показника залежності динамічної якості трибоспряжень функціонально-важливих поверхонь деталі в залежності від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу їх формоутворення [15].

- коефіцієнту запасу рідинного трибоконтракту функціональних поверхонь деталі в імовірних умовах їх функціонування у виробі в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу [15];

- параметру залежності корозійної стійкості (фретінг-корозії) поверхонь деталі в умовах потенційного функціонування виробу від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь [15, 16].

5. Етап інтерактивного лінійного нормування кваліметричних критеріїв та поточного розрахунку функції мети вибраного структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

6. Етап направленої пошуку альтернативних варіантів структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу за евристичними правилами.

7. Етап формалізації результатів структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу за системним кваліметричним критерієм.

Розглянемо алгоритм структурно-параметричної оптимізації більш докладно. Узагальнена блок-схема алгоритму наведена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритму направлено пошуку альтернативних та оптимальних параметрів у-го технологічного переходу х-ї операції

Для кожної і-ї деталі, що включає в себе $j=1$ поверхонь в систему інтерактивно вносять конструкторську інформацію $\{Ef_{ij}\} \cap \{L_{ij} \wedge D_{ij}\} \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ про такі параметри, як геометрична форма $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j=1$ поверхонь деталі, їх розміри $\{L_{ij} \wedge D_{ij}\}$, параметри точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та задані параметри міцності $\{HB_{ij}\}$ (блок 3 – рис. 1). Крім того, формалізації підлягають фізико-механічні показники матеріалу даної деталі $Md_i = \{\sigma_{bi}; \sigma_{ti}; \sigma_{-1i}; \tau_{-1i}; E_i; G_i; j_i; \lambda_i; \tau_{xi}\}$ та матеріалу спряжених з нею деталей $Md_{(i+1)} = \{HB_{(i+1)}; E_{(i+1)}; \mu_{(i+1)}; \lambda_{(i+1)}\}$. Важливим є також формальна інтерпретація особливих умов Um_i силового $\{Pr_i\}$ навантаження, динамічної $\{Dn_i\}$ кінематичної $\{Kn_i\}$, температурної $T_{i(i+1)}$ взаємодії та параметрів трибоконтакту $f_{i(i+1)}$ зі спряженими деталями у виробі а також кінематичних обмежень $\{Mz_i\}$, що встановлюються конструктором в процесі функціонування деталі:

$$Um_i = \{ \{Pr_i\}; \{Dn_i\}; \{Kn_i\}; T_{i(i+1)}; f_{i(i+1)}; \{Mz_i\} \}.$$

Очевидно, що більшість цих показників визначається з статистичного або довідкового репозиторію даних.

3D моделювання – це стандартний етап практично усіх сучасних систем автоматизованої технологічної підготовки виробництва. В даному випадку доцільно представити геометричну інформацію у форматі двовимірної векторної графіки IGES (InitialGraphics Exchange Specification) або GEO (Graphics Engineering Object Data), що є форматом векторних тривимірних зображень, який переважно асоційований з VideoScape 3D Object [11]. Таке представлення дає можливість реалізації безпаперової інтерактивної системи документообігу з метою більш ефективного обміну конструкторсько-технологічною інформацією в єдиних уніфікованих STEP-форматах (iso 10303 «Standard for Exchange of Productmodeldata») та прототипах репозиторія даних (MIL-STD-2549 «ConfigurationManagementDataInterface») [11]. У CAD - системі виконується перетворення геометричних образів поверхонь, які підлягають обробці, в цифрові масиви даних. Таким чином створюються універсальні цифрові моделі деталі і заготовки, що забезпечує можливість опрацювання конструкторсько-технологічної інформації за допомогою універсальних алгоритмів, реалізованих у САЕ, САРР, САВ та САМ-системах.

В результаті виконання етапу попереднього аналізу напружено-деформованого стану виробу у змодельованих умовах експлуатації, що реалізується у таких відомих САЕ-системах, як CosmosWorks, Abaqus, SolidEdge, Catia, Unigraphics тощо, отримуємо іміта-

ційно-аналітичні картини нормальних та тангенціальних напружень, деформацій та термодинамічного стану виробу: $\{\sigma_{o_j}; \tau_{o_j}; \Delta_{o_j}; T_{o_j}\}$. Реалізація даного етапу обумовлена необхідністю формування бази даних з оперативної аналітичної інформації для подальшого розрахунку локальних критеріїв - кваліметричних показників виробу в результаті формування макрогеометричних та залишково-деформаційних параметрів окремих поверхонь в процесі їх формоутворення.

Формування альтернативних варіантів структури і параметрів технологічного процесу (блок 4 – рис. 1) в САРР-системі (Computer Aided Planning Production) – важливий і невід’ємний етап оптимізації. Під час реалізації цього етапу формується маршрут оброблення і-ї деталі як сукупність технологічних операцій х-ї структури: $M_i = \{O_{ix}(\text{var})\}$. Кожна така операція характеризується коротжею параметрів (технологічних переходів): $O_{ix} = \{P_{ixy}(\text{var}) \forall x = \overline{1, X}\}$, що визначаються показниками: швидкості різання $V_{ixy}(\text{var})$, подачі $S_{ixy}(\text{var})$, глибини різання $t_{ixy}(\text{var})$ та параметрами інструмента $Ins_{ixy}(\text{var})$:

$$P_{ixy} = \{V_{ixy}(\text{var}) \wedge S_{ixy}(\text{var}) \wedge t_{ixy}(\text{var}) \wedge Ins_{ixy}(\text{var}) \forall y = \overline{1, Y}\}.$$

Причому формальна характеристика інструмента не обмежується геометричними показниками $\gamma_{ixy}(\text{var}), \alpha_{ixy}(\text{var}), \phi_{ixy}(\text{var})$, але включає також вибір інструментального матеріалу та типу покриття $Mins_{ixy}(\text{var})$:

$$Ins_{ixy} = \{\gamma_{ixy}(\text{var}) \wedge \alpha_{ixy}(\text{var}) \wedge \phi_{ixy}(\text{var}) \wedge Mins_{ixy}(\text{var}) \forall y = \overline{1, Y}\}.$$

Попереднє формування альтернативних варіантів структури та параметрів технологічного процесу відбувається на основі методології прототипування [4] і включає в себе ряд формальних ревалентних процедур розпізнавання геометричної форми об’єкту виробництва $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j = \overline{1, J}$ поверхонь деталі, аналізу їх розмірів $\|L_{ij} \wedge D_{ij}\|$, параметрів точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та заданих параметрів міцності $\{HB_{ij}\}$ (блок 1 даного алгоритму).

Найбільш ревалентний аналог, що є в базі даних САРР-системи, узгоджується та адаптується до вхідних даних з врахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва на основі логічних формалізованих процедур [4]. У САРР - системі програміст-технолог в ручному режимі тільки узгоджує та затверджує запропоновані САРР-системою геометричні параметри інструменту, необхідні параметри та характеристики верстата. Далі автоматично вирішується завдання для визначення ефективного розподілу припуску по критерію забезпечення уточнень, що експотенційно зменшується на чорнових, чистових та фінішних переходах. Процедура ефективного розподілу припуску по окремих технологічних переходах дозволяє визначити найбільш раціональну стратегію механічної обробки. Далі включається в роботу модуль САРР-системи, який, виконуючи моделювання процесу зрізання припуску, відповідно до вибраної стратегії, автоматично, на кожному кроці моделювання, формує вихідний варіанткортежу параметрів режимів різання в залеж-

ності від виду обробки - точіння, фрезерування або шліфування тощо.

Для кожного х-го варіанту структури технологічної операції і у-го варіанту технологічного переходу в САРР-системі імітаційно моделюється картина напружено-деформованого стану NDSxy відповідної поверхні (в т.ч. залишкові параметри напруження I і II роду та деформації) в процесі її формоутворення:

$$NDS_{xy} = \{\bar{\sigma}_{xy}; \bar{\tau}_{xy}; \sigma_{xy}^{\pm}; T_{xy}; \epsilon_{xy}; \dot{\epsilon}_{xy}; \beta_{xy}; \sigma_{залxy}; \sigma_{залxy}^{\pm}; \Delta_{xy}\}.$$

Детально формування результатів такого моделювання викладено в роботах [17 – 19].

На основі цих розрахунків спочатку визначають геометрико-кінематичну складову мікронерівності Δ_1 , потім вібраційну складову Δ_2 та деформаційну складову Δ_3 [17 – 19]. Така постановка задачі дозволяє формалізувати процес формування мікронерівностей профілю як множини параметрів мікротопології поверхні: $\{Rmax; Rpk; Rvk; Rk; v; t; B; Kp; Kv\} = f(\Delta_1; \Delta_2; \Delta_3)$. Причому, при моделюванні трибоконтакту параметри мікротопології поверхонь повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Дьомкіна [20]. При цьому еквівалентна несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоспряження в ступені, що змінюється від 0,2 до 1,0, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їх висотні та крокові параметри.

На етапі розрахунку локального критерію - інтенсивності зношування функціональних поверхонь важливим є визначення умов функціонування трибоконтакту за критерієм Грінвуда-Вільямсона [13].

У відповідності до виконання умови:

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > 0,89 \cdot \mu_1 \cdot \left(\frac{H_1}{E_1}\right)^2,$$

розраховується показник зносостійкості

$$I_{h_{xy}} = f(\mu_v, \lambda_{xy}, v_{ekv}, Rmax_{ekv}, E_{ekv}, b_{ekv}, tm_{ekv}, \sigma_{211}^{\pm})$$

на основі пружного або пружно-пластичного контакту спряжених поверхонь. Більш детально цей етап розрахунку описано в роботі [15].

Для розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу за показником втомної міцності n_{-1} функціональних поверхонь деталі в потенційних або критичних умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь застосовують формулу Гафа і Поларда [13].

Попередньо з врахуванням домінування нормальних або крутних напружень повинні бути розраховані такі параметри, як коефіцієнт концентрації напружень $n_{вк}$; коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі $n_{вд}$; коефіцієнт впливу шорсткості поверхні $n_{вR}$; коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникли в результаті механічного оброблення деталі $n_{вz}$ та коефіцієнти чутливості до асиметрії циклу навантаження Ψ_{σ} і Ψ_{τ} .

Локальний критерій триботехнічної якості спряжень (що визначається як енергетичні втрати на тертя в спряжених поверхнях деталей машин) характери-

зується таким важливим показником як коефіцієнт тертя, що розраховується в залежності від прогнозованих параметрів спряжених поверхонь трибоконтакту: $F_s = f(b_{ekv}, v_{ekv}, Rmax_{ekv}, tm_{ekv})$.

Розрахунок локального критерію – мастильної утримуючої здатності функціональних поверхонь деталі в потенційних або критичних умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь визначається коефіцієнтом запасу S рідинного трибоконтакту. Цей показник визначається як відношення мінімальної товщини мастильного шару h_{min} і критичною мінімальною товщиною мастильного шару h_{kp} , що є межею переходу рухомих спряжених поверхонь з напіврідинного режиму в режим рідинного змащування. Причому мінімальна товщина мастильного шару h_{min} формується, виходячи не тільки з конструктивних параметрів опорних поверхонь трибоспряжень, якості мастила та динаміки роботи механізму, у склад якого входить виріб, а також з врахуванням мікротопології поверхонь спряження: $h_{min} = f(Rmax_{ekv}, Rv_{ekv})$.

Алгоритм розрахунку локального критерію корозійної стійкості функціональних поверхонь деталі в потенційних або критичних умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення передбачає розрахунок параметру інтенсивності фретинг-корозійного руйнування цих поверхонь в об'ємному або лінійному еквіваленті. Оскільки мікроступи лінійно рухаються по поверхні металу зі швидкістю v , причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і проробляє борозну з усередненою глибиною $(Rpk_{ekv} + Rk_{ekv})$, це і є приводом для констатації факту впливу мікротопології обробленої поверхні на явища корозійного руйнування. Причому процес руйнівного окислення відповідає логарифмічному закону Г. Уліга [16].

Підпрограма визначення комплексного показника функціональної ефективності F_{xy} (блок 5) включає також призначення евристичних коефіцієнтів ваг: $\{\alpha_n (\forall n = 1, N)\}$, розрахунок нормалізованих локальних критеріїв оптимізації за показником зносостійкості Q_1 ; за коефіцієнтом запасу втомної міцності Q_2 ; за параметром триботехнічної якості спряжень Q_3 ; за параметром корозійної стійкості Q_4 ; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту Q_5 . Остаточню узагальнений критерій оптимізації F_{xy} , визначається за формулою (4).

Алгоритм направлено пошуку альтернативних параметрів у-го технологічного переходу х-ї операції:

$$P_{ix(y+1)} = \{V_{ix(y+1)}(var); S_{ix(y+1)}(var); t_{ix(y+1)}(var); Ins_{ix(y+1)}(var)\}$$

та генерування альтернативних варіантів структури технологічного процесу: $M_{i(x+1)y} = \{O_{i(x+1)y}(var)\}$ відбувається за евристичними правилами і виконується у такій спосіб:

1. Вибрану згідно результатів роботи САРР-системи (блок 4) подачу коректують спочатку в напрямку зростання: $S_{ix(y+1)}(var) = S_{ixy} + \Delta S_{ixy}$ (блок 6). Якщо розрахований (блок 11) узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$), то подачу коректують в на-

прямку зменшення: $S_{ix(y+1)}(var) = S_{ixy} - \Delta S_{ixy}$. Це відбувається шляхом присвоєння кроку ΔS_{ixy} негативного значення (блок 16). Причому виконання цих ітерацій виконують до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не буде оптимізоване (стане максимальним), або подача не вийде за межі нижченаведених умов 2,3 або 4 даного алгоритму.

2. При цьому слід обмежувати подачу величиною, що допускається міцністю різального інструменту S_{pi} (блок 8). Наприклад, для точіння [21]:

$$S_{ix(y+1)} \leq S_{pi} = x_{pz} \sqrt{\frac{B^2 \cdot H[\sigma_i]}{6 \cdot c_{pz} \cdot l \cdot t^{y_{pz}}}}, \quad (5)$$

де l - виліт різця (в даному випадку може бути розрахований як $l = (1...1,5)H$);

$[\sigma_i]$ - допустиме напруження на згин матеріалу державки різця;

x_{pz}, y_{pz}, c_{pz} - величини, що залежать від властивостей оброблюваного матеріалу і геометрії ріжучого інструменту, виду охолодження тощо [21];

B і H - ширина і висота державки інструменту відповідно.

3. Крім того, необхідно обмежувати подачу величиною, що допускається жорсткістю заготовки $S_{жз}$ (блок 9) для забезпечення нормативного значення допуску геометричної форми [21]:

$$S_{ix(y+1)} \leq S_{жз} = x_{pz} \sqrt{\frac{\epsilon_i \cdot J_i \cdot E_i \cdot [W_{ij}]}{1,1 \cdot c_{pz} \cdot l^3 \cdot t^{y_{pz}}}}, \quad (6)$$

де $[W_{ij}]$ - допустиме відхилення форми j -ї поверхні i -ї деталі;

E_i - модуль пружності матеріалу оброблюваної заготовки;

J_i - момент інерції перерізу заготовки (для круглих суцільних деталей $J = 0,05d^4$, де d - діаметр заготовки);

l - відстань між точками закріплення заготовки або виліт деталі при закріпленні її тільки в патроні;

ϵ_i - коефіцієнт жорсткості, залежить від способу закріплення заготовки на верстаті.

4. Важливою умовою можливості реалізації процесу механічного оброблення є обмеження потужності різання N_e параметром потужності головного привода вибраного САРР-системою верстата N_B з врахуванням його ККД (η):

$$N_B \cdot \eta > N_e = \frac{P_z \cdot V_{ixy}}{1020 \cdot 60}, \quad (7)$$

де $P_z = f(S_{ixy}; t_{ixy}; \{INS\}_{ixy}; HB_i; \sigma_i)$ - сила різання, що визначається імітаційно САФ-системою (блок 7).

5. З метою уникнення безперервної циклічності алгоритму та зменшенні логічно не обґрунтованих розрахунків, у розрахунок вводять т зв. «плаваючий лічильник неефективних ітерацій», який в початкових умовах приймається рівним 0 (блок 2) (для розрахунку оптимальної подачі цей лічильник позначають k , для розрахунку глибини різання – m , а для швидкості різання – r). Якщо зростання оптимізованих параме-

трів не збільшує критерій оптимальності $F_{x(y+1)}$, то значення лічильника ітерацій збільшують на 1 (блоки 14, 30 та 45) а приростам параметрів ($\Delta S_{ixy}, \Delta t_{ixy}, \Delta n_{ixy}$) присвоюють негативні значення (блоки 16, 32 та 47). Це ж повторюється і у випадку недотримання умов 2, 3 та 7 даного алгоритму (блоки 8, 9, 10, 24, 25, 26, 41). Якщо ж і зменшення оптимізованих параметрів не призводить до позитивного результату (зростання критерію оптимальності $F_{x(y+1)}$), то лічильник ітерацій збільшують ще на 1 і у відповідності до умов (блоки 13, 29 та 44), цикл оптимізації даного параметру переривають (констатуючи на цьому етапі його оптимальне значення (блоки 18, 34, 49)) і переходять до оптимізації наступного параметру

6. Глибину різання коректують аналогічно подачі шляхом початкового зростання попередньо визначеного значення t_{ixy} на крок Δt_{ixy} : $t_{ix(y+1)}(var) = t_{ixy} + \Delta t_{ixy}$ (блок 22) Якщо ж узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$) (негативне значення умови - блок 28), то глибину різання зменшують: $t_{ix(y+1)}(var) = t_{ixy} - \Delta t_{ixy}$ (блоки 32 і 22) до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не стане максимальним, або глибина різання не вийде за межі попередніх умов 2, 3 або 4 даного алгоритму (блоки 24 – 26).

7. Вибрану згідно результатів роботи САРР системи (блок 6) швидкість різання аналогічно коректують спочатку в напрямку її зростання: $V_{ix(y+1)}(var) = V_{ixy} + \Delta V_{ixy}$. Якщо узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$) (блок 43), то швидкість коректують в напрямку зменшення: $V_{ix(y+1)}(var) = V_{ixy} - \Delta V_{ixy}$. Ці процедури, як і у випадку корекції подачі, виконують до тих пір, поки значення

критерію $F_{x(y+1)}$ не буде найвищим, або швидкість різання не вийде за межі умови 4 (блок 41).

5. Висновки та результати

1. На основі аналізу літературних джерел доведено, що на сьогоднішній день немає усталеної методики структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу сформованого за функціонально-орієнтованим принципом структурного синтезу.

2. Функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри функціонально-орієнтованого технологічного процесу є інтегральний кваліметричний критерій технічного рівня виробу, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій під час формоутворення цих поверхонь.

3. Наведений алгоритм визначення комплексного показника функціональної ефективності виробів машинобудування в умовах їх потенційного або критичного функціонування в складі машини або технологічної системи. Цей алгоритм включає також призначення евристичних коефіцієнтів ваг, розрахунок нормалізованих локальних критеріїв оптимізації за найбільш вживаними в інженерній практиці експлуатаційними показниками базується на методиці направлено пошуку за формалізованими евристичними правилами.

Література

1. Гутья, С. С. Системное моделирование качества механизмов и машин [Текст] / С. С. Гутья // Труды Одесского политехнического университета. – 2003. – Вып. 2 (20). – С. 14–21.
2. Stupnytsky, V. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering [Text] / V. Stupnytsky // Europa is che Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, Stuttgart: ORT Publishing. – 2013. – № 3. – P. 346–354.
3. Stupnytsky, V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment [Text] / V. Stupnytsky // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – Vol. 2, Issue 9. P. – 1181–1186.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. [Текст] / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Davim, J. P. Machining of hard materials [Text] / J. Paulo Davim. – Springer, London, 2011. – 225 p.
6. Klocke, F. M. Development of a Material Damage Model for the Prediction of Chip Breakage [Text] : proc. of the 10th inter. conf. / F. Klocke, D. Lung, C. Essig, M. Abouridouane // Technology of Plasticity (ICTP 2011). – 2011. – Vol. 3. – P. 612–617.
7. Yoshimura, M. System Design Optimization for Product Manufacturing [Text] / M. Yoshimura // Concurrent Engineering. – 2007. – Vol. 15(4). – P. 329–343.
8. Рыжов, Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки [Текст] / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
9. Diactu, E. The Computer Aided Design Conception the Concurrent Engineering Context [Text] / E. Diactu, I. Armas // Nanyang Technological University, School of Mechanical and Aerospace Engineering. – 2011. – Vol. 2. – P. 29–38
10. Алексеев, А. В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений [Текст] / А. В. Алексеев, А. Н. Борисов, Э. П. Вилломс и др. – Рига: Зинатне, 1997. – 320 с.
11. Balakrishna, A. Integration of CAD/CAM/CAE in Product Development System Using STEP/XML [Text] / A. Balakrishna, R. Suresh Babu, D. Nageswara Rao, R. Raju, S. Kolli // Concurrent Engineering. – 2006. – Vol. 14 (2). – P. 121–128.
12. Крагельский, И. В. Основы расчета на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
13. Мышкин, Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. [Текст] / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

14. Сафонов, Б. П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений. [Текст] / Б. П. Сафонов, А. В. Бегова. – Новомосковск: Изд-во МХТУ им. Менделеева, 2004. – 65 с.
15. Ступницький, В. В. Триботехнічний критерій формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. пр. / В. В. Ступницький, Є. М. Махоркін // Луцький національний технічний університет «Наукові нотатки». – 2013. – Вип. 42. – С. 305–313.
16. Улиг, Г. Г. Коррозия и борьба с ней [Текст] / Г. Г. Улиг, Р. У. Реви. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.
17. Ступницький, В. В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні [Текст] / В. В. Ступницький, Я. М. Новіцький // Машинознавство. – 2013. – № 1-2 (187-188). – С. 19–22.
18. Лившиц, О. П. Моделирование формирования пластической составляющей высоты неровностей при лезвийной обработке методом конечных элементов [Текст] / О. П. Лившиц, А. Е. Родыгина // Металлообработка. – 2008. – № 6. – С. 8–12.
19. Родыгина, А. Е. Применение метода конечных элементов в исследовании формирования шероховатости поверхности с учетом пластического течения материала при несвободном резании [Текст]: сб. труд. Всерос. конф. / А. Е. Родыгина // Будущее машиностроения России. – МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – С. 36–37.
20. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
21. Безъязычный, В. Ф. Расчет режимов резания [Текст] / В. Ф. Безъязычный, И. Н. Аверьянов, А. В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.

Виділено основні питання використання на залізницях вантажних вагонів різної форми власності, включаючи кількість, структуру вагонного парку колії 1520 мм. Розроблено організаційно-технологічну модель керування маршрутними перевезеннями вантажів у вагонах різної форми власності з урахуванням розрахункової економії експлуатаційних витрат при пріоритетному обслуговуванні відправників вантажу та вантажоодержувачів

Ключові слова: єдина система керування парком вантажних вагонів, операторська компанія, відправницький маршрут

Выделены основные вопросы использования на железных дорогах грузовых вагонов разной формы собственности, включая количество, структуру вагонного парка колеей 1520 мм. Разработана организационно-технологическая модель управления маршрутными перевозками грузов в вагонах различной формы собственности с учетом расчетной экономии эксплуатационных расходов при приоритетном обслуживании грузоотправителей и грузополучателей

Ключевые слова: единая система управления парком грузовых вагонов, операторская компания, отправительский маршрут

УДК 656.212:656.225

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТНЫХ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ

А. В. Кулешов

Аспирант

Кафедра управления грузовой
и коммерческой работой*

E-mail: kul2002@rambler.ru

В. В. Кулешов

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра железнодорожных станций и узлов*

E-mail: kul2002@rambler.ru

*Украинская государственная академия

железнодорожного транспорта

пр. Фейербаха, 7, г. Харьков, Украина, 61050

1. Введение

Одним из приоритетных направлений реформирования железнодорожного транспорта Украины является изменение технологий, систем взаимодей-

ствия с пользователями железнодорожных услуг, включая компании-операторов подвижного состава, операторы перевозок, экспедиторов при применении новейших инструментариев управления доставкой массовых грузов с учетом приоритетности обслу-