
Системи приводів. Технологія і обладнання машинобудівного виробництва. Мехатроніка

+УДК 621.10.355

О.Ф. Саленко,
О.М. Мана,
В.А. Нікітін,
Ю.О. Павлюченко,
С.В. Коваленко

Кременчуцький національний університет ім. М.Остроградського, Кременчук, Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ПЕРФОРУВАННЯ СТІЛЬНИКІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

FUNCTIONALLY ORIENTED APPROACH TO IMPROVE PROCESSES WATERJET PERFORATION OF HONEYCOMB COMPOSITES

Розглянуто питання проектування технологічних процесів з використанням функціонально-орієнтованого підходу. Показано, що розподіл функцій на корисні, некорисні та шкідливі дозволяє виявити раціональну послідовність технологічних переходів, а також забезпечити мінімізацію шкідливих функцій. Формування графа забезпечення функцій матеріальними носіями — переходами та етапами технологічного процесу — дає можливість виявити функції об'єкта через властивості створюваних елементів виробу. Наведені результати розвивають уявлення про особливості створення функціонально-орієнтованих технологій в загальному машинобудуванні. Теоретичні узагальнення доповнені прикладом використання підходу при удосконаленні технології гідроабразивної прошивки отворів малого діаметра у стільникових виробках з композиційних матеріалів.

Ключові слова: Функціонально-орієнтований підхід, процеси обробки, матеріальні носії, корисні та шкідливі функції.

Вступ

Функціональний підхід до процесу розробки і створення нових машин, предметів та складних технічних систем вивчався багатьма дослідниками, найбільш систематизований викладено в [1], де зазначається, що будь-який матеріальний об'єкт є певною сукупністю (матрицею) функцій, серед яких можна виявити корисні, шкідливі та нейтральні функції. Тоді їх загальна класифікація відповідатиме рисунку 1. При цьому функціональний підхід, на відміну від підходу предметного, виходить із того, що створюваний виріб повинен реалізовувати низку функцій, які можуть забезпечуватися окремими матеріальними носіями, що є найдешевшими або робота з якими є найменш витратною.

Цей підхід може бути поширено і на обробні технології, що дозволяє оптимізувати процес виготовлення деталей та максимально наблизити властивості готового виробу до потреб пристрою або вузла у цілому. Це відкриває значні перспективи використання даного методу в сучасному машинобудуванні. З цих питань найбільш систематизовані відомості надано у роботах [23].

Кожна функція присутня в об'єкті в тому чи іншому вигляді, однак для споживача важливими є виключно функції корисні, а не шкідливі, з якими слід боротися. При цьому шкідливі функції можуть бути ослаблені або повністю усунені додатковими технологічними переходами або відповідним підбором відповідних матеріальних носіїв, які з мінімальними витратами забезпечують потрібне виконання корисних функцій і зменшують, або, в ідеальному випадку, унеможливають появу функцій шкідливих та нейтральних.

Незважаючи на значні теоретичні напрацювання з даного питання, вибір раціональних матеріальних носіїв здійснюється в основному ітераційним способом, тобто перебором можливої сукупності матеріальних носіїв та визначенням найбільш прийнятної комбінації.

Однак, як було зазначено, перспективним може бути і такий технологічний процес, на переходах якого одночасно із формуванням функцій корисних відбувається ослаблення або ліквідація функцій шкідливих і, за можливості, усунення функцій нейтральних.

Отже, мета дослідження — створення методологічної основи для розробки технологічних процесів на основі

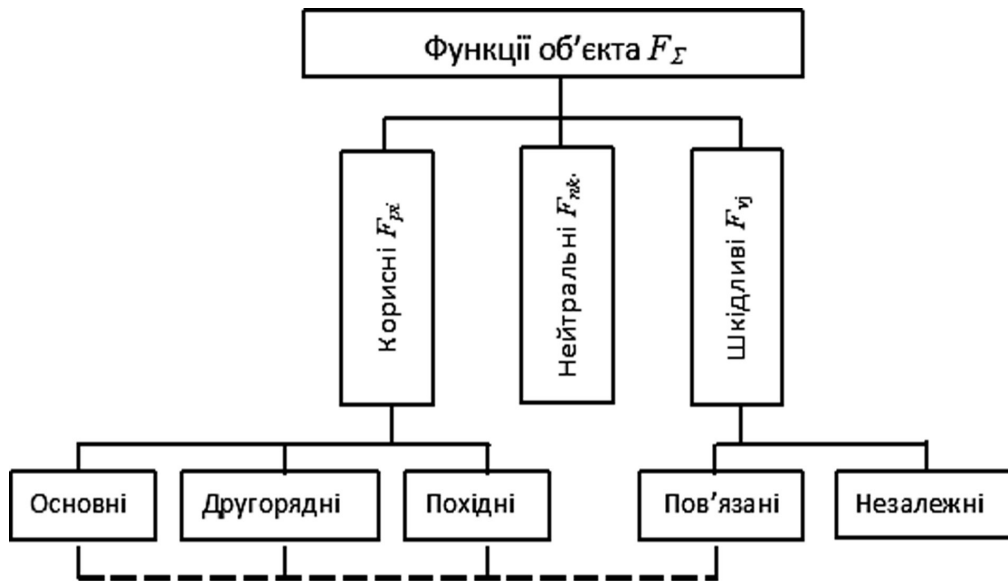


Рисунок 1 — Класифікація функцій об'єкта

функціонально орієнтованого підходу до забезпечення властивостей оброблюваного виробу.

Результати досліджень

Виходячи з того, що для кожного виробу можемо виокремити три етапи (рівня) його існування, закладення матеріальних носіїв функцій відбуватиметься, як показано на рисунку 2.

На етапі створення аналізується сукупність функцій, що має реалізовувати вироб, визначається головна функція, сполучені з нею корисні, нейтральні та шкідливі функції (якщо вони чітко прослідковуються), а також відбувається попереднє встановлення матеріальних носіїв функцій та сполучення їх між собою. При цьому можливе виникнення нових ефектів (тобто поява нових функцій), що мають позитивний або негативний характер. Використання морфологічного аналізу або інших методів аналізу сукупності властивостей складних об'єктів дозволяє виявити можливі раціональні комбінації матеріальних носіїв, а також способи технологічного впливу на матеріальні потоки упродовж виготовлення виробу.

На другому етапі — етапі виробництва — відбувається реалізація закладених технологічних процесів, направлених на матеріалізацію потрібних функцій готового виробу. При цьому матеріальний потік трансформується, перетворюється та набуває вигляду готового виробу. Матеріальні носії функцій розглядаються тепер не як окремі детерміновані ланки, а як певні елементи, властивості яких обумовлені процесами їх отримання. Це дозволяє розглядати матеріальний носій не тільки за фізичною сутністю (наприклад, сталь має певні фізикомеханічні характеристики, зокрема, HRC 3236, $\sigma_b=2200 \text{ МПа}$ тощо), а і за способом певної дії над ними (за сутністю обробних процесів — для досягнення потрібної твердості або межі міцності сталь необхідно піддати термообробці).

Останній етап — це власне етап експлуатації готового виробу. Він виявляє свої корисні функції (головні та другорядні), нейтральні та шкідливі; однак протягом роботи рівні його функцій змінюються. Пошкодження виробу відбувається тоді, коли корисні функції вже не проявляються на рівні, обумовленому технічними або технологічними вимогами; або навпаки, шкідливі

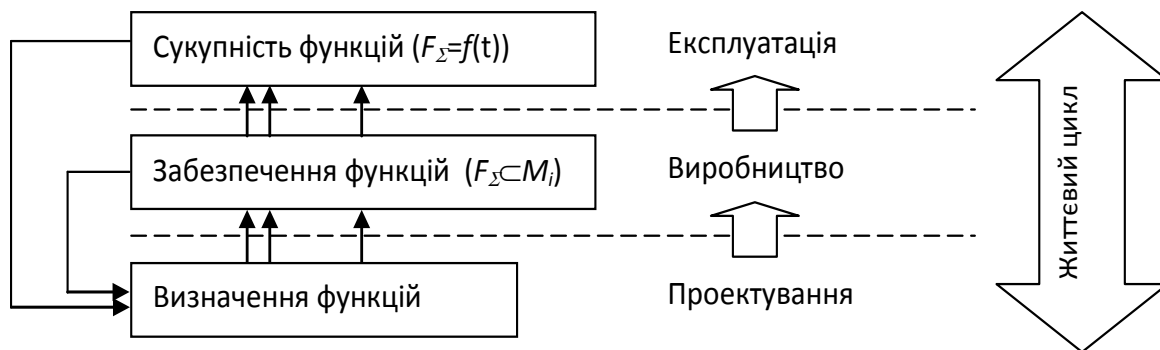


Рисунок 2 — Рівні існування

функції, неподолані під час проектування та виробництва, починають набувати характеру превалюючих, що також веде до виходу виробу із ладу.

Можна зазначити, що параметрична відмова виробу проявлятиметься як зниження рівня корисних функцій (що призведе до втрати виробом параметрів міцності, геометричної точності тощо), функціональна — як раптова подія, що призвела до зміни сукупності функцій, закладених при проектуванні та виготовленні.

Аналіз типових виробів машинобудування із позицій функціонального підходу доводить, що практично завжди формування конкретної корисної споживчої функції F_p буде пов'язане із появою нейтральних F_n та шкідливих F_v функцій. Тож ідеальним з точки зору експлуатації є вироб, що несе тільки корисні у певних конкретних умовах функції. Отже, можна записати умову ідеального виробу

$$F_p = F_{pz}, F_v = 0, F_n \rightarrow \min, \quad (1)$$

де F_{pz} — задані корисні властивості виробу.

Тоді споживчі властивості виробу (його фізико-механічні характеристики, геометричні параметри тощо) визначатимуться

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} + \sum_{j=1}^m F_{nj} + \sum_{k=1}^p F_{vk}. \quad (2)$$

Тож маємо обмеження (1) та оптимізаційне рівняння (2), яке дозволяє виконати пошук найбільш раціональних матеріальних носіїв та методів їх отримання.

Повернемося до тези, що будьякі корисні функції завжди сполучаються із функціями нейтральними або шкідливими. Наприклад, корисна функція лампочки розжарювання — випромінювати світло, однак негатив — частина енергії витрачається на тепло. Тоді можна припустити, що між цими функціями існує певний функціональний зв'язок. Так, для попереднього прикладу, збільшення яскравості свічення веде до пропорційного зростання теплового потоку; збільшення запасу міцності виробу з певного матеріалу неодмінно веде до зростання його маси. Тоді

$$F_v = pF_p, F_n = qF_p. \quad (3)$$

Нехай кожен функцію формує технологічний процес W_p . Наявність функціонального зв'язку за (3) дає змогу записати вираз (2) у наступному вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^l W_{pi} F_{pi} + \sum_{j=1}^m W_{pj} q F_{pj} + \sum_{k=1}^p W_{pk} p F_{pk}. \quad (4)$$

Зважаючи на те, що технологічний процес отримання виробу априорі не може бути направлений на надання йому шкідливих властивостей, мінімізація зайвих властивостей, перед усім вилучення шкідливих за умовою (1), дає змогу записати вираз, що відображає наближення реального виробу до ідеального через сукупність його властивостей:

$$P = \sum_{i=1}^l W_{pi} F_{pi} + \sum_{j=1}^m \bar{W}_{pj} q F_{pj} + \sum_{k=1}^p \bar{W}_{pk} p F_{pk}. \quad (5)$$

При виконанні певних перетворень матимемо вираз

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} (\bar{W}_p + \bar{W}_p q + \bar{W}_p p). \quad (6)$$

Наближення виробу із сукупністю властивостей (6) до ідеального передбачає перетворення складових $\bar{W}_n q$ та $(\bar{W}_v p)$ в нуль, що можливо за умови відсутності функціонального зв'язку між корисними та шкідливими властивостями або за умови, що процес створення функції

з обраним матеріальним носієм одночасно є інверсним до створення шкідливої функції.

Наявність та взаємозв'язок між окремими елементами технологічного процесу дозволяє записати вираз (6) у наступному вигляді

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} (W_p + \bar{W}_p q + \bar{W}_p p + \bar{W}_p (p+q)). \quad (7)$$

Оскільки створення конкретного виробу завжди передбачає певну кількість альтернатив, отримана залежність має бути доповненою кількісними ознаками кожної із функцій (як корисних, так і шкідливих), які формуватимуть інтегральний показник якості виробу I .

Тоді (7) надасть змогу записати вираз

$$I = \sum_{i=1}^l F_{pi} (b_{ki} W_{pi} - \bar{b}_{vi} \bar{W}_{pi} p - \bar{b}_{ri} \bar{W}_{pi} (p+q)) \quad (8)$$

за умови, що $\bar{b}_{ni} \bar{W}_{pi} q = 0$. Тут b_{ki} — відповідні вагові коефіцієнти кожної з корисних функцій, \bar{b}_{vi} — вагові коефіцієнти кожної зі шкідливих функцій (від'ємна складова), \bar{b}_{ri} — вагові коефіцієнти взаємодії незалежних переходів, що виявляють резерви у зміні вихідних властивостей готового виробу.

Для з'ясування дії окремих переходів на формування функцій виробу розглянемо процес його обробки. При цьому вважатимемо, що для виробів із композиційних матеріалів матеріальні носії функцій можуть бути змінені не тільки через вибір матеріалу, а і використанням певної структури та прийомів отримання матеріалу.

Технологічний процес є сукупністю операцій та переходів, направлених на зміну розмірів, стану або параметрів оброблюваних поверхонь. Тоді, якщо технологічний процес обробки деталі складається з кількох операцій Q_p , кожна з яких реалізується на окремих переходах P_{ij} , послідовне виконання переходів призведе до формування на заготовці ряду поверхонь E_i (рисунок 3) та набуття нею кінцевого вигляду, вираженого через кількісні та якісні ознаки функцій. При цьому реалізація окремих переходів (P_{ij}) призведе до появи як корисних, так і нейтральних та шкідливих функцій, створюваних обробленими елементами як матеріальними носіями (рисунок 3, б)

Зображена на рисунку 3,б схема дозволяє постулювати граф обумовленості функцій як елементами виробу, так і переходами технологічного процесу, внаслідок яких ці елементи формуються.

Таким чином, описуючи об'єкт виробництва завданням його вихідного стану N_0 як сукупності параметрів, що характеризують форму й розміри заготовки, матеріал та механічні властивості, а кінцевий стан C_k через визначення форми, розмірів, точності, фізико-механічних властивостей тощо, функцію перетворення φ_0 властивостей потоку деталей з вихідного стану — заготовки — в кінцевий стан — виріб — можна надати у такий спосіб

$$\varphi_0 : \{C_{n1}, C_{n2} \dots C_{nr}\} \rightarrow \{C_{k1}, C_{k2} \dots C_{rT}\}$$

де φ_0 — функція технологічного перетворення властивостей предмета обробки; C_{nr} — Re елементарна властивість заготовки; C_{kT} — Te елементарна властивість виробу; R — загальне число властивостей заготовки; T — загальне число властивостей виробу.

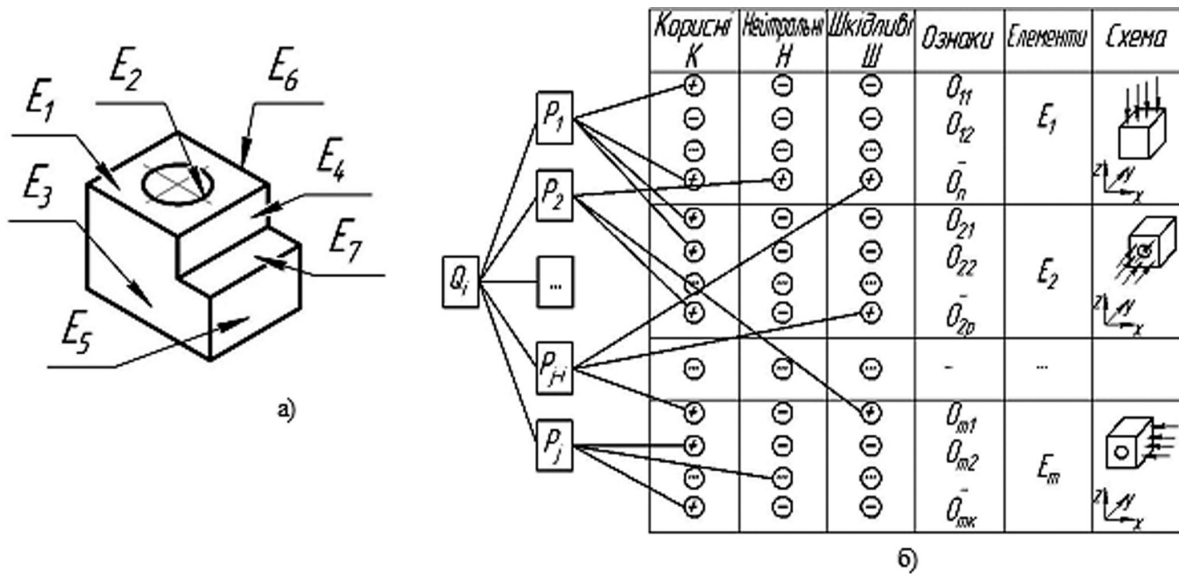


Рисунок 3 — Елементи виробу, отримувані під час реалізації технологічних операцій (а) та формування функцій елементами виробу (б)

Тоді технологічний процес як результат формування певних функцій виробу, виражених, наприклад, через параметри геометричної точності (IT), дефектності (Td) та шорсткості (Ra) оброблюваних поверхонь уявимо відповідно до схеми, поданої на рисунку 4. Вважатимемо, що вихідні ознаки утворюють масив значень V .

Поділимо ознаки V_{ij} на низку елементів L_k , утворюваних під час обробки на заготовці, які в сукупності множини однозначно визначатимуть ознаки V оброблюваної деталі.

Позначимо корисні властивості як K_m , нейтральні — N_p та шкідливі — S_u . Згідно (7) із сукупності можливих варіантів технологічних процесів кращим є той, який не

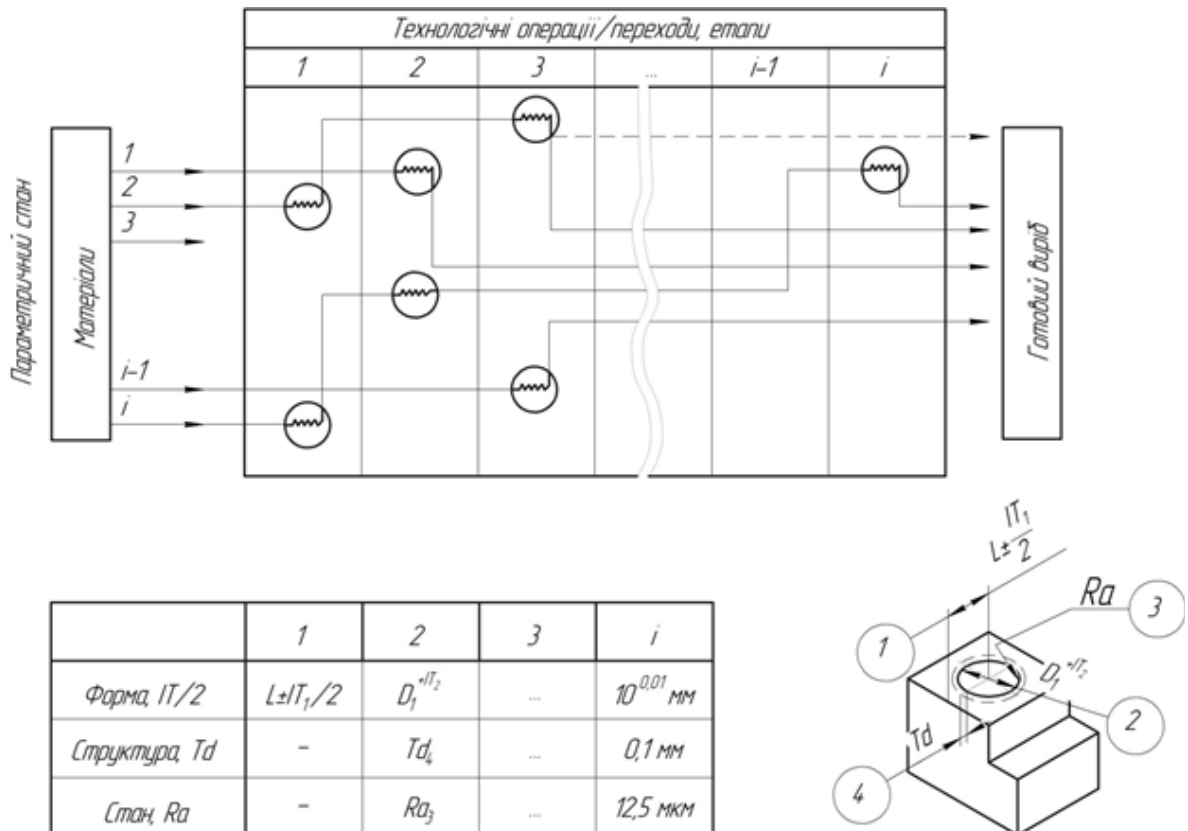


Рисунок 4 — Формування властивостей виробу, виражених через геометричну точність (IT) дефектність (Td) та шорсткість поверхні (Ra), на окремих переходах (етапах) технологічних операцій. Зміну рівня параметрів показано умовно

Таблиця 1 — Забезпечення корисних функцій елементами технологічного процесу та виникнення шкідливих функцій

№ п/п	Функції виробу	Забезпечення елементами виробу (рисунок 3)	Матеріальні носії – елементи технологічного процесу	Виникнення шкідливих функцій
1	2	3	4	5
1	F_{p1}	$E_2 \cap E_3 \cap E_4$	$W_{p1} * W_{pj} + W_{p3}$	----
2	F_{p2}	$E_2 \cap E_3 + E_7 \cap E_8$	$W_{p4} * W_{p7} + W_{p3} * W_{p5} + W_{p2}$	F_{p1}
...				
L	F_{pl}			

передбачає виникнення шкідливих властивостей виробу, або який має мінімальну кількість таких властивостей, що усуваються на майбутніх переходах мінімальною кількістю робочих рухів, витрат потужності тощо. У той же час корисні властивості виробу мають бути отримані із мінімальними матеріальними витратами.

Оскільки формування певних функцій виробу, виражених через набуття елементами виробу параметрів точності та стану, відбувається, як правило, на кількох технологічних переходах, причому одночасно формуються як корисні, так і шкідливі властивості, доцільне складання відповідних таблиць стану, в яких систематизуються засоби забезпечення параметрів матеріальних носіїв функцій, власне — параметрів стану окремих елементів виробу.

Отже, за рахунок виявленої послідовної зміни стану форми та відносного розташування елементів маємо змогу відобразити граф (рисунок 4) обумовленості сукупності функцій виробу елементами технологічного процесу.

Нехай створюваний виріб має сукупність корисних функцій $F_1 \dots F_l$. Для їх забезпечення повинні бути реалізовані технологічні переходи (операції), кожний з яких направлений на створення конкретної функції, тобто $F_i := W_{p_i}$, або функція формується через послідовне виконання переходів, таких як $F_i := W_{p1} * W_{pj} * \dots$ або функція може бути сформована як альтернатива кількох різних переходів, тобто $F_i = W_{p3} + W_{pj+2} + \dots$ (таблиця 1). Матеріальні носії функцій тепер виявлятимуться як певна сукупність технологічних переходів над елементами виробу E_p , виконання яких може розглядатися як процес формування корисних властивостей виробу. Інколи для швидкоплинних процесів та процесів, вихідні параметри яких обумовлюються нестационарними явищами у зоні обробки, технологічні переходи вимагають додаткового розбиття на окремі етапи.

При цьому оскільки набуття заданих функцій виробу є багатоваріантною задачею, оптимізація переходів може бути реалізованою на основі методів комбінаторики.

Записані в наведеній таблиці рівняння можуть бути спрощеними за відомими правилами Булевої алгебри, за умови виконання вимоги (7), що потребує додаткової диференціації операцій. Пошук оптимальної послідовності переходів та перехід до оцінки ефективності технологічного процесу, що дозволяє отримати виріб з інтегральним показником, визначеним (8), доцільно виконувати із залученням підходів морфологічного аналізу.

Таким чином, запропоновано методологію розробки технологічних процесів виготовлення виробів як процесу формування його функцій матеріальними носіями — технологічними засобами — дозволяє виявити раціональну послідовність та доцільність виконання кожного із переходів, встановити обумовленість виникаючих шкідливих властивостей як побічного наслідку при формуванні властивостей корисних та виконати пошук альтернативних матеріальних носіїв — технологічних переходів з метою зменшення кількості та якості шкідливих властивостей.

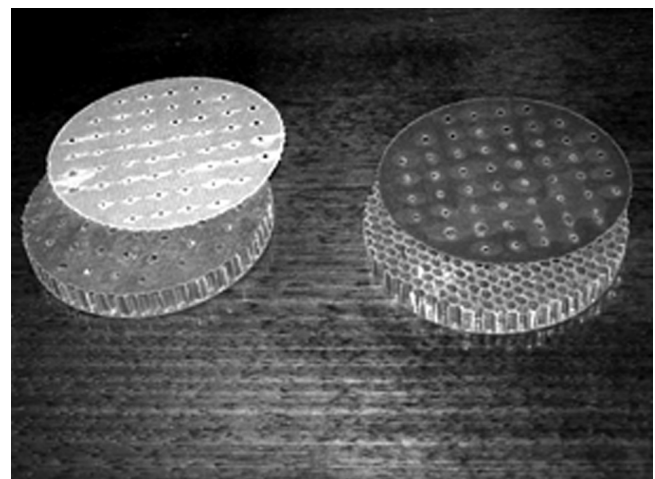


Рисунок 5 — Приклад виконання отворів у елементах стільникової композиційної панелі

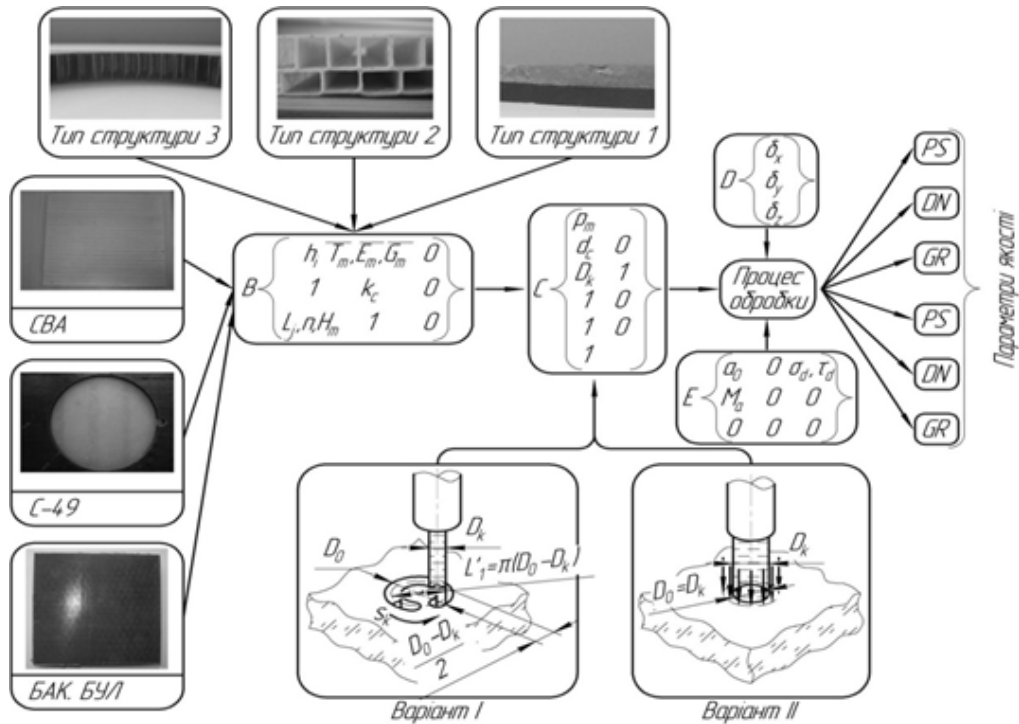


Рисунок 6 — Варіанти виконання отворів у стільникових панелях гідроабразивним методом (до уваги прийнято склопластик СВА, вуглепластик С-49, бакелітовий стільник БАК)

Приклад використання запропонованого функціонального підходу та обговорення отриманих результатів

У якості прикладу розглянемо використання функціональноорієнтованого підходу до удосконалення процесу гідроабразивного прошивання отворів у стільникових композиційних панелях. Такі отвори зазвичай виконують для покращення шумопоглинальної властивості захисних кожухів турбоагрегатів літаків, перекачувальних станцій тощо.

Для випадку отримання отворів малого діаметра гідроабразивним методом диференціації операцій, згідно результатів, поданих нами в [4], повинно здійснюватися відповідно до етапів взаємодії струменя із оброблюваним матеріалом. При цьому прийемо, що на основі [5] сам процес гідроабразивної обробки обумовлюватиметься визначеною кількістю факторів, які умовно можна звести до таких множин (рисунок 6): 1) множина характеристик оброблюваного матеріалу, $B = \{G_i; F_j; Z_k\}$; 2) множина характеристик умов формування різального струменя та особливостей його натікання на поверхню оброблюваного матеріалу, $C = \{S_i; N_j\}$; 3) множина динамічних характеристик гідроструминних головок та приводів подач $D = \{GL_i; PR_j\}$; 4) наявність активізаторів процесу обробки, $E = \{AB_i; T_j; M_k\}$.

Комбінація елементів множин B, C, D та E для кожного різновиду обробки що виконуються, $A = \{P_i; R_i\}$, дає множину вихідних параметрів якості Q, до якої можна віднести показники, що однозначно характеризують стан матеріалу після струминного впливу.

З урахуванням того, що при перфоруванні розглядається процес струминноабразивного формування отворів з контурною подачею або без неї, зазначені множини набудуть вигляду:

$$B = \begin{Bmatrix} G_1 & F_1 & 0 \\ G_2 & F_2 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 \end{Bmatrix}; C = \begin{Bmatrix} S_1 & 0 \\ S_2 & 0 \\ S_3 & N_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}; D = \begin{Bmatrix} 0 & PR_x \\ 0 & PR_y \\ 0 & PR_z \end{Bmatrix};$$

$$E = \begin{Bmatrix} AB_1 & 0 & M_1 \\ AB_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}; Q = \begin{Bmatrix} PR_1 \\ PR_2 \\ PR_3 \\ PR_4 \\ 0 \end{Bmatrix},$$

або при позначенні кожної із окладових відповідними параметрами процесу

$$B = \begin{Bmatrix} h_i & \bar{T}_m, \bar{E}_m \bar{G}_m & 0 \\ 1 & k_c & 0 \\ L_j, n, H_m & 1 & 0 \end{Bmatrix}; C = \begin{Bmatrix} p_m & 0 \\ d_c & 1 \\ D_k & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix}; D = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix}$$

$$E = \begin{Bmatrix} a_0 & 0 & \sigma_d, \tau_d \\ M_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}; Q = \begin{Bmatrix} DN \\ PS \\ GR \end{Bmatrix}.$$

де h_i — товщина стінки стільника; L_j, n, H_m — параметри, що характеризують стільник (міжстінкова відстань, кількість стінок, вид армування); $\bar{T}_m, \bar{E}_m \bar{G}_m$ — параметри, що характеризують механічні властивості стільника; k_c — поправковий коефіцієнт; C — масив, що характеризує енергетику струменя (тиск витікання рідини, діаметр сопла,

Таблиця 2 — Етапи формування струминноабразивного потоку та сприйняття

Етапи		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
Керуючий імпульс		Відкриття					Закриття	
Робочий інструмент - потік		Відсутній	Зростаючий, $v_n=0 \rightarrow v_{крит}$	Початок руху абраз. зерен, $v_{крит} \rightarrow v_{max}$	Уповільнення потоку, $v_{max} \rightarrow v_c$	Стала течія, $v_c = const$	$v_c = const$	Припинення потоку, $v_c \rightarrow 0$
Сприйняття впливу поверхнею	Гідродинамічн.	$P_z=0 \rightarrow P_{zi}$		$P_{zi} \rightarrow P_{zmax}$	$P_{zmax} \rightarrow P_{zn}$			$P_{zn} \rightarrow 0$
	Абразивний	$M_a=0$		$M_a=0 \rightarrow M_n$	$M_n \rightarrow M_{max}$	$M_{max} = const$		$M_{max} \rightarrow 0$

діаметр калібрувальної трубки; D — масив параметрів точності приводів подач.

Комбінація впливу режимів ведення обробки, конструктивних особливостей елементів гідроструменевого обладнання та загальної схеми обробки дозволяє постулювати такий граф обумовленості $Q=\{RP_j\}$, параметрами $B=\{G_i; F_j; Z_k\}$, $C=\{S_i; N_j\}$, $D=\{GL_i; PR_j\}$, $E=\{A-B_i; T_j; M_k\}$, де GR — точність відтворення форми отворів та їх місцезосташування, PS — параметри шорсткості, Ra, мкм, та DN — величина деструкції. Оскільки виконання отворів у стільникових панелях може здійснюватися за усім перетином, так і виключно в одному (або в двох) елементах, деталізований масив вихідних параметрів позначиться так: h'_d, h''_d — товщина деструктивного шару на верхньому та нижньому елементах стільникової панелі відповідно (перший показник — для листа); h'_{dp}, h''_{dp} — товщина початкової деструкції, мм (в момент наскрізного прошивання) оброблюваної заготовки; w, w' — величина розшарування армованого матеріалу; R_a, R_a', σ_{Ra} — шорсткість торців верхньої та нижньої панелей стільника та дисперсія розсіювання даного показника, мкм; Δ_x, Δ_y — похибки розташування осі отвору, мм; D'_o, D''_o — фактичний розмір отвору на верхній та нижній панелях стільника, мм; T_D — відхилення від циліндричності наскрізного отвору, мм.

Диференціацію елементів процесу виконано за результатами, що отримані при дослідженні особливостей гідроабразивного прошивання отвору струменем рідини малого діаметра [6] та наведені в таблиці 2.

Система диференціальних та звичайних рівнянь, використовуваних для моделювання взаємодії струменя із оброблюваною заготовкою шаруватого типу, передбачає опис взаємодії на різних, наданих у таблиці 2, етапах.

Втаблиці прийнято такі позначення: $v_{крит}$ — швидкість, достатня для створення розрідження у камері змішування, спроможного викликати початок руху абразивних зерен; v_{max} — максимальна швидкість витікання рідини із сопла, визначена потужністю мультиспікатора; v_c — усереднена швидкість рідинно-абразивного потоку, визначена за витратою абразиву; P_{zi} — гідродинамічне

навантаження поверхні від дії струменя, що витікає із сопла зі швидкістю вкрит; P_{zmax}, P_{zn} — максимальне та усереднене гідродинамічне навантаження від дії абразивно-рідинного струменя; M_n — миттєва витрата абразиву в момент, коли швидкість витікання струменя із струминного сопла становить $v_{крит}$; M_{max} — усереднена масова витрата абразиву.

При цьому окремо розглянуті процеси в гідросистемі та на поверхні тіла. У цьому випадку процеси у гідрорізній системі відбуваються так:

■ початок руху поршня та відкриття відсікача потоку в магістралі високого тиску

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{1}{m} (pF - p_B F_B - P) \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{k}{x+x_0} \left[\frac{f_e k p_m \sqrt{RT_M \varphi(\sigma)}}{F} - p \frac{dx}{dt} \right] \\ \frac{dp_B}{dt} &= \frac{k}{s+x_{0B}-x} \left[p_B \frac{dx}{dt} - \frac{f_e B \cdot K p_B^{(3k-1)/2k} \sqrt{RT_M \varphi(\sigma_B)}}{F_B p_B^{(3k-1)/2k}} \right] \end{aligned} \right\}; t=T_2;$$

■ рух рідини через сопло при відкритті голкового дроселю

$$Q_b = \mu \pi d_a \frac{x}{2} \tan(\alpha) \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_b};$$

■ витікання рідини із магістралі високого тиску, що надходить від гідроаккумулятора

$$\frac{dp_b}{dt} = - \frac{\frac{\mu c f_c v_c(p_b) E_b(p_b)}{v_{ao}}}{k_{a0} + k_{a1} p_b + k_{a2} p_b^2 + k_{a3} p_b^3};$$

■ розрідження у камері змішування при русі струменя у засопловому просторі

$$-p_k = C_p \frac{p_b w_j}{w_k};$$

■ масова витрата абразиву через канал підведення

$$M_a = \sqrt{\frac{\Delta p}{[\varepsilon \cdot \rho_T + (1-\varepsilon) \cdot \rho_B]}} F \rho_T \varepsilon,$$

причому

$$\Delta p = \frac{[\varepsilon \cdot \rho_T + (1-\varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot F \cdot v^2 \cdot \Delta t}{F \cdot \Delta t};$$

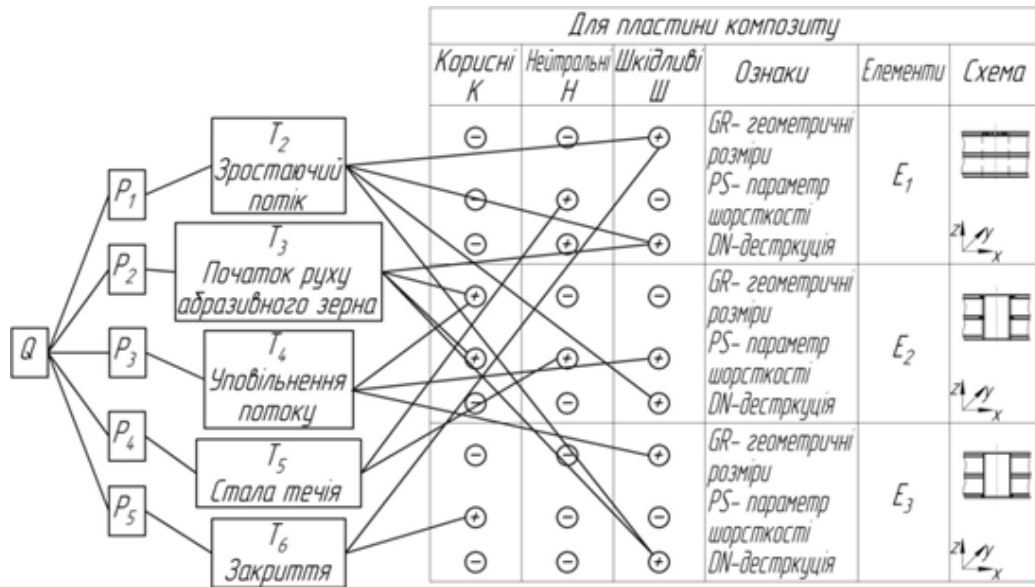


Рисунок 7 — Формування властивостей елементів поверхонь стільника при гідроабразивному прошиванні отвору

- усереднена швидкість двофазного потоку

$$Q_b = \mu \pi d_a \frac{x}{2} \tan(\alpha) \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_b};$$

Процеси на поверхні твердого тіла

Перший етап. Вплив струменем рідини, що починає витікати із сопла і сягає максимальної швидкості (початкове руйнування та утворення сітки мікротріщин від гідродинамічного навантаження):

- гідродинамічний вплив

$$R = p_0(t) \frac{\pi D_k^2}{2} \left(1 - \frac{1}{100 \frac{\rho_m}{\rho} \left(\frac{v_{стп}(t)}{v_0} \right)^2} \right);$$

- пружне втиснення верхнього шару матриці у функції часу

$$U(t) = - \frac{(1 - 2\nu)p_0(t) \left(\frac{D_k}{2} \right)^2}{4G}, \quad 0 < \frac{D_i}{2} < \frac{D_k}{2};$$

$$H(t) = - \frac{(1 - 2\nu)p_0(t) \left(\frac{D_k}{2} \right)^2}{G},$$

- для шаруватого напівпростору, що складається

із N шарів у системі координат $y_1 \dots y_3$ нумерованих $s=(1,N)$ з урахуванням жорсткого контакту між шарами та з початковими умовами на вільній границі $Q_{31} = P_1 \delta_{NN1} \delta(y_1) \delta(y_2)$, $Q_{32} = P_2 \delta_{NN1} \delta(y_1) \delta(y_2)$, $Q_{33} = P_2 \delta_{NN1} \delta(y_1) \delta(y_2)$, напружений стан визначається трансформантами характеристик із врахуванням того, що навантаження прикладене до вільної границі першого шару:

- переміщення

$$u_n^{(s)F} = \frac{(-1)^{n+1} i^{(1-\delta_{3n})}}{\Delta} \sum_{j=1}^6 \left[\sum_{m=1}^2 \alpha_{jm}^{(s)(n)} (y_3 + h_{s-1})^{(m-1)(\delta_{sj} + \delta_{ej})} \right] \times \Delta_{6(s-1)+m} e^{(-1)^{j+1} \gamma_i^{(s)} (y_3 + h_{s-1})},$$

- напруження

$$Q_{nm}^{(s)F} = \frac{i^{(\delta_{n1} + \delta_{n2} + \delta_{m1} + \delta_{m2})(\delta_{n3} + \delta_{m3})}}{\Delta} \times \sum_{j=1}^6 \left[\sum_{q=1}^2 \gamma_{jq}^{(s)(nm)} (y_3 + h_{s-1})^{(q-1)(\delta_{sj} + \delta_{ej})} \right] \Delta_{6(s-1)+m} e^{(-1)^{j+1} \gamma_i^{(s)} (y_3 + h_{s-1})}.$$

Перехід до оригіналів

$$p_n^{(s)F} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty f(x) e^{-\lambda x} dx$$

Обмеження за часом T_2

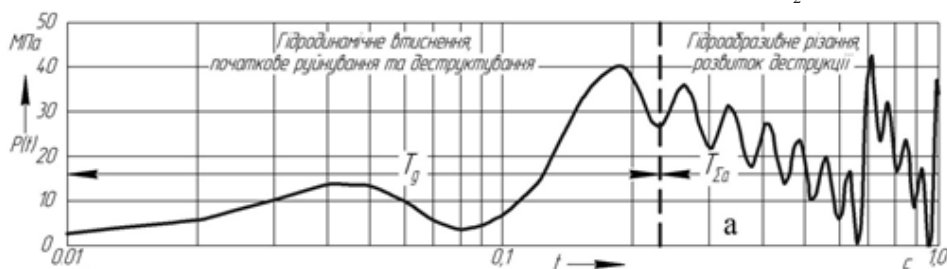


Рисунок 8 — Етапи взаємодії струменя з оброблюваною поверхнею

$$T_2 = 1,42 \frac{\pi r_c^2 \rho_g c_g v_{max}}{1 + \frac{\rho_g c_g}{\rho_m c_m}} \cdot \frac{1 - v}{G}$$

Другий етап. Сприйняття поверхнею струминно-абразивного потоку та робота руйнування, яку частинка виконує в перепоні.

■ рух частинки в перепоні (оброблюваному матеріалі)

$$m_a \frac{dx_a^2}{dt^2} = -\frac{1}{2} C_x \rho_c S(h) \frac{dx_a}{dt} - \sigma_{cc}(t) S(h),$$

■ об'єм зйому матеріалу

$$w_l = \frac{M_a}{m} w_s; w_s = \frac{\pi x_a^2 (3R - x_a)}{3}$$

Обмеження за часом витікання рідини із магістралі високого тиску, що надходить від гідроаккумулятора, до моменту закриття клапана

$$T_\Sigma = T_3 + T_4 + T_5 + T_6 = \left(\sum_{j=1}^N h_{cj} - H_u \right) \cdot \frac{\pi D_{ki}^2}{4w_l}$$

Відшарування поверхневого шару та деструкція на межі «матриця — армувальні волокна»:

$$Z_i \frac{d^4 w}{dy^4} = P(y) - q(y, t), \text{ де } Z_i = \frac{E_y h_i}{12(1 - \mu^2)}$$

Поширення деструкції h_{dp} за межі зони струминного впливу

$$h_{dp} = C \frac{G(3m - 1)\sigma_0 \delta}{2\pi l \sigma^2}$$

Обмеження за часом

$$T_5 + T_6 = \left(\sum_{j=1}^N h_{cj-1} - H_u \right) \cdot \frac{\pi D_{ki}^2}{4w_l}$$

Використання запропонованої методики дозволило процес формування отворів у стільниковій заготовці зобразити у вигляді схеми рисунку 7. При цьому було звернуто увагу на те, що існування окремих етапів взаємодії дозволяє більш детально проаналізувати особливості виникнення отвору та встановити, що гідродинамічне навантаження поверхні (рисунк 8) — це шкідлива функція технологічного процесу, оскільки відбувається гідродинамічне навантаження поверхні, яке веде до виникнення деструкції зони впливу, у той час коли власне різання починається тільки після надходження абразивних частинок до потоку рідини (через час $t=0,15$ — $0,2$ с, рисунок 8).

Зазначену шкідливу функцію подолано часовою затримкою процесу обробки на час прояву шкідливої функції; при цьому у подальшому маємо функцію корисну, оскільки той же потік, але змінивши свій фазовий склад, вже виконує інтенсивне гідроабразивне зношування поверхні, внаслідок чого формується отвір у заготовці, діаметр якого відповідає діаметру струминного потоку.

Отже використання функціонально орієнтованого підходу дозволяє виявити раціональні умови ведення

обробки та створити нове прогресивне технологічне оснащення.

Подальше удосконалення методу вбачається в розробці підходів до визначення функціонального зв'язку між корисними і шкідливими функціями через засоби реалізації функцій — елементів технологічного процесу. Окрім того, розвитку потребує і апарат аналізу графів забезпечення властивостей виробу з урахуванням особливостей структури матеріалу, можливе використання також апарату теорії автоматизованого керування у задачах оцінки вихідних параметрів складних технологічних процесів та окремих переходів.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють розвинути уяву про особливості створення функціонально орієнтованих технологій у загальному машинобудуванні шляхом врахування корисності функцій об'єкту виробництва (тобто поділу функцій на корисні F_p , шкідливі F_v та нейтральні F_n) та формування графу забезпечення функцій матеріальними носіями — елементами технологічного процесу, що виявляють функції через властивості створюваних елементів (поверхонь) виробу. Використання умов та обмежень, запропонованих у роботі, дозволяє пов'язати функції корисні, шкідливі та нейтральні між собою та виявити умови передування виникнення шкідливих функцій, а залучення апарату Булевої алгебри дозволяє сполучити та мінімізувати кількість переходів (як матеріальних носіїв функцій).

Запропонована методологія розробки технологічних процесів виготовлення виробів як процесу формування його функцій матеріальними носіями — технологічними засобами — дозволяє виявити раціональну послідовність та доцільність виконання кожного із переходів, встановити обумовленість виникаючих шкідливих властивостей як побічного наслідку при формуванні властивостей корисних та виконати пошук альтернативних матеріальних носіїв — технологічних переходів з метою зменшення кількості та якості шкідливих властивостей

Приведений приклад використання довів ефективність підходу, оскільки вдалось удосконалити технологічний процес відповідно до поставленого завдання

Література

1. Голибардов, Е.И. Техника ФСА / Е.И. Голибардов. — К.: Техника, 1989 г. — 220 с.
2. Михайлов, А.Н. Разработка технологий на основе функционально-ориентированного подхода / А.Н. Михайлов — Донецк, ДонНТУ, 2008. — 450 с. — ил.
3. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов — М: Машиностроение, 2002. — 480 с.
4. Salenko, A.F. Some aspects of composite materials hydro jetting from the point of view of linear mechanics destruction / A.F. Salenko, V.G. Docenko, A.V. Fomovskaya,

A.N. Mana // Известия на техническия университет. — Габрово, 2008. — Том 36. — С. 26—33.

5. Мана, О.М. Запобігання деструкції композитних матеріалів при виконанні операцій струминно-абразивного прошивання малих отворів / О.М. Мана // Промислова гідраліка і пневматика — 2012. — Вип. № 3(37). — С.45—56.

6. Саленко, А.Ф. Техніка та технологія гідроструменевої обробки / А.Ф. Саленко, В.Б. Струтинський — К.: ВІПОЛ, 1998. — 240 с.

References

1. Golibardov, E.I. (1989), Tehnika FSA [Technique VEA], Technika, Kyiv.

2. Mihaylov, A.N. (2008), Razrabotka tekhnologiy na osnove funktsionalno-orientirovannogo podkhoda, [Development of technologies based on the function-oriented campaign], DonNTU, Donetsk.

3. Suslov, A.G. (2002), Nauchnyie osnovy tehnologii mashinostroeniya, [Scientific basis of mechanical engineering], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

4. Salenko, A.F., Docenko, V.G., Fomovskaya, A.V. and Mana, A.N. (2008), Some aspects of composite materials hydro jetting from the point of view of linear mechanics destruction, Journal of the Technical University of Gabrovo, No. 36, PP. 26—33.

5. Mana, O.M. (2012), Preventing the degradation of composite materials perform operations abrasive jet insertion of small holes, Industrial hydraulics and pneumatics, No. 3(37). S. 45—56.

6. Salenko, A.F. and Strutinskiy, V.B. (1998), Tekhnika ta tekhnologiya gidrostrumenevoyi obrobki, [Technique and technology of water-jet processing], VIPOL, Kyiv.

Надійшла 16.09.2014 року

удк. 621.10.355

Функциональноориентированный подход к совершенствованию процессов гидроабразивной перфорации сот из композиционных материалов

**А.Ф. Саленко, А.Н. Мана, В.А. Никитин,
Ю.А. Павлюченко, С.В. Коваленко**

Рассмотрены вопросы проектирования технологических процессов с использованием функционально ориентированного подхода. Показано, что деление функций

на полезные, бесполезные и вредные позволяет выявить рациональную последовательность технологических переходов, а также обеспечить минимизацию вредных функций. Формирование графа обеспечения функций материальными носителями — переходами и этапами технологического процесса — дает возможность выявить функции объекта через свойства создаваемых элементов изделия. Приведенные результаты развивают представление об особенностях создания функционально ориентированных технологий в общем машиностроении.

Теоретические обобщения дополнены примером использования подхода при совершенствовании технологии гидроабразивной прошивки отверстий малого диаметра в сотовых изделиях из композиционных материалов.

Ключевые слова: Функционально ориентированный подход; процессы обработки; материальные носители; полезные и вредные функции.

UDC 621.10.355

Functionally oriented approach to improve processes waterjet perforation of honeycomb composites

**A.F. Salenko, A.M. Mana, V.A. Nikitin,
U.O. Pavluchenko, S.V. Kovalenko**

The paper deals with the design process with the use of functionally oriented campaign. It is shown that the division of functions to useful, useless and harmful reveals a rational sequence of technology transition, and to ensure the minimization of harmful functions. Formation of the graph functions to ensure the material carriers — transitions and stages of the process — makes it possible to identify the function of the object through the properties of the constructed element of the product. These results develop an idea about creating a functionally oriented technologies in general engineering.

Theoretical generalizations supplemented example of an approach for improving the technology of waterjet firmware small holes in cell products from composite materials.

Keywords: Functionally oriented approach, treatment processes, material objects, useful and harmful functions.