

УДК 004.925.8: 629.7

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.117664

Комп'ютерне варіантне динамічне формоутворення технічних об'єктів на прикладі крила літака

В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, С. Г. Вірченко, А. Й. Незенко

Подано методику застосування структурно-параметричного геометричного моделювання для комп'ютерного динамічного формоутворення технічних об'єктів на прикладі крила літака. Запропонований підхід та розроблені нові прийоми автоматизованого проектування забезпечують можливість комплексного опрацювання різноманітних технологічних процесів, що використовуються під час виготовлення промислової продукції

Ключові слова: комп'ютерне варіантне динамічне формоутворення, крило літака, структурно-параметричне геометричне моделювання

1. Вступ

Питання вдосконалення технічних об'єктів завжди актуальні. Прогресивними в цьому плані є комп'ютерні інформаційні технології. Комплексна автоматизація виробництва забезпечує скорочення термінів створення нової продукції, суттєво підвищує якість і зменшує собівартість. Важливою задачею є поєднання автоматизованого проектування та виготовлення продукції, інтеграція яких здійснюється на базі геометричного моделювання. Технологічні процеси машинобудування, зокрема авіаційної галузі, характеризуються великим числом складальних операцій, обробляння різанням, тиском і т. д., значною кількістю можливих варіантів реалізації. Існуючі вимоги щодо підвищення точності, гнучкості, продуктивності, скорочення термінів підготовки виробництва потребують застосування нових підходів у галузі комп'ютерних інформаційних технологій, що обумовлює актуальність окресленої наукової проблематики.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Важливий для машинобудування напрямок упровадження комп'ютерних інформаційних технологій полягає у використанні параметричного підходу до геометричного моделювання під час автоматизованого проектування. Так у роботі [1] на прикладі варіантного тривимірного конструювання деталей-штирів викладено загальний порядок формування типової геометричної моделі з необхідними розмірами-параметрами та потрібними взаємозв'язками між ними. Головну увагу приділено інтеграції засобів системи Pro/Engineer та електронних таблиць Microsoft Excel, обґрунтовано можливість підвищення продуктивності автоматизованого конструювання за рахунок цього. Універсальність і гнучкість параметричних прийомів геометричного моделювання підтверджує публікація [2], де подано відповідні комп'ютерні побудови таких розповсюджених машинобудівних виробів як гвинтові циліндричні дротяні пружини. Працею [3] показано ефективність даних інформаційних технологій для автоматизованого ві-

дтворення складаних одиниць машинобудування на прикладі механізму з двома кінематичними парами. Остання робота поширює прийоми параметричного геометричного моделювання на складанні одиниці. Однак загальним недоліком наведених праць можна вважати те, що в них не аналізуються питання інтеграції конструювання технічних об'єктів, наприклад, із розрахунками на міцність, процесами виготовлення, експлуатації тощо. У дослідженні [4] висвітлено проведення кінематичної оптимізації механічних систем на засадах динамічного комп'ютерного моделювання. Публікація [5] показує ефективність використання параметричних геометричних засобів для поєднання автоматизованого твердотільного формоутворення з розрахунками на міцність та розробкою конструкторської документації. Отже бачимо, що прогресивною сучасною тенденцією є розширення сфери практичного застосування параметричного геометричного моделювання під час створення різноманітних технічних об'єктів.

Певним удосконаленням проаналізованого підходу до комп'ютерного геометричного моделювання є структурно-параметричне формоутворення, основні положення якого подано у праці [6]. При цьому одна структурно-параметрична геометрична модель узагальнює кілька параметричних, чим суттєво підвищується універсальність та продуктивність автоматизованого проектування. У публікації [7] викладено деякі питання застосування структурно-параметричного формоутворення для розробки літака, однак основну увагу приділено етапу ескізного конструювання. У статті [8] зроблено акцент на ефективне комп'ютерне моделювання великої номенклатури уніфікованих груп деталей, проте задачі інтеграції з технологією їх виготовлення, розрахунками на міцність і т. п. не розглядались. У праці [9] показано, що подальшим розвитком структурно-параметричного геометричного моделювання є комп'ютерне варіантне динамічне формоутворення.

Таким чином, виконаний аналіз літературних даних свідчить про те, що перспективною в теоретичному і практичному плані можна вважати розробку нових методів, способів, прийомів та алгоритмів інтегрованого комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів і процесів машинобудування на засадах структурно-параметричного геометричного моделювання.

3. Мета та задачі дослідження

Мета досліджень полягає в розробці на базі структурно-параметричного геометричного моделювання методики комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів із наведенням ілюстрацій на прикладі крила літака.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

- запропонувати математичний апарат динамічного формоутворення технічних об'єктів;
- виконати автоматизовану варіантну побудову поверхні крила літака;
- здійснити динамічне комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання лонжерона центральної частини (центроплана) крила літака.

4. Математичний апарат динамічного формоутворення технічних об'єктів

Для комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів застосовуватимемо геометричні фігури відповідно до їх класифікації за вимірністю

$$\Phi = (\Phi_i)_0^3, \quad (1)$$

де Φ_0 – точки, Φ_1 – лінії, Φ_2 – поверхні, Φ_3 – тіла.

Геометричні параметри подаватимемо у вигляді кортежу

$$P = (P_i)_1^3, \quad (2)$$

де P_1, P_2, P_3 – параметри положення, розмірів та форми.

Згідно з виразом (2) можливі динамічні геометричні модифікації описуватимемо множиною

$$M = (M_i)_1^3, \quad (3)$$

де M_1 – модифікації положення (рух), M_2 – модифікації розмірів (подібність), M_3 – модифікації форми (деформації).

На підставі співвідношень (1)–(3) досліджувані види динамічних модифікацій фігур визначаються кортежем

$$M\Phi = (M\Phi_i)_0^9, \quad (4)$$

де $M\Phi_0 = \Phi_0 \times M_1$, $(M\Phi_i)_1^3 = \Phi_1 \times M$, $(M\Phi_i)_4^6 = \Phi_2 \times M$, $(M\Phi_i)_7^9 = \Phi_3 \times M$.

Опрацьований об'єкт є певною комбінаторною конфігурацією з елементів множини (1), а його модифікації – з елементів кортежу (3). Слід враховувати подальшу деталізацію цих компонентів, наприклад у вигляді

$$\Phi_1 = (\Phi_{1_i})_1^3 = (L_i)_1^3, \quad (5)$$

де Φ_{1_1} =(лінії першого порядку)=(L_1), Φ_{1_2} =(лінії другого порядку)=(L_2), Φ_{1_3} =(лінії інші)=(L_3);

$$\Phi_2 = (\Phi_{2_i})_1^3 = (P_i)_1^3, \quad (6)$$

де Φ_{2_1} =(поверхні перенесення)=(P_1), Φ_{2_2} =(поверхні обертання)=(P_2),

$\Phi_{23}=(\text{поверхні інші})=(\Pi_3);$

$$\Phi_3 = (\Phi_{3_i})_1^3 = (T_i)_1^3, \quad (7)$$

де $\Phi_{3_1}=(\text{тіла багатогранні})=(T_1)$, $\Phi_{3_2}=(\text{тіла обертання})=(T_2)$, $\Phi_{3_3}=(\text{тіла інші})=(T_3)$;

$$M_1 = (M_{1_i})_1^3 = (m_i)_1^3, \quad (8)$$

де $M_{1_1}=(\text{паралельне перенесення})=m_1$, $M_{1_2}=(\text{поворот})=m_2$, $M_{1_3}=(\text{симетрія})=m_3$;

$$M_2 = m_4, \quad M_3 = m_5, \quad (9)$$

де $m_4=(\text{масштабування пропорційне})$, $m_5=(\text{масштабування непропорційне})$.

На засадах структурно-параметричного формоутворення довільний модельований геометричний об'єкт O подається упорядкованою множиною елементів

$$O = (o_i)_1^{N_o}. \quad (10)$$

Можливі різновиди o_i відтворюються кортежами варіантів

$$o_i = (o_{ij})_1^{N_{o_i}} \quad (11)$$

та векторами параметрів

$$P_{i_j} = (p_{i_{jk}})_1^{N_{p_{i_j}}}, \quad (12)$$

де $N_{p_{i_j}}$ – кількість параметрів j -го варіанта i -го елемента.

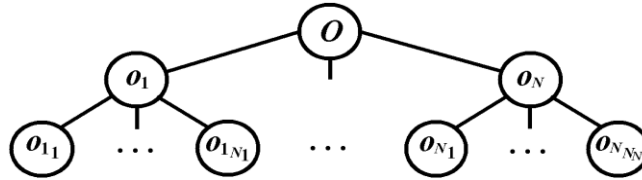
Структурний взаємозв'язок між різновидами n -ї та m -ї складової об'єкта O визначають матриці суміжності (рис. 1, а)

$$C_{nm} = \|c_{n_r} c_{m_s}\|; \quad n \in N; \quad m \in N; \quad n \neq m; \quad r \in \{1, \dots, N_n\}; \quad s \in \{1, \dots, N_m\}, \quad (13)$$

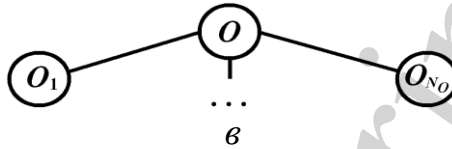
де $c_{n_r} c_{m_s} \neq 0$ при можливій взаємодії варіантів o_{n_r} та o_{m_s} , $c_{n_r} c_{m_s} = 0$ – у протилежному випадку.

$O_n \backslash O_m$	O_{m1}	...	O_{mNm}
O_{n1}
...
O_{nNm}

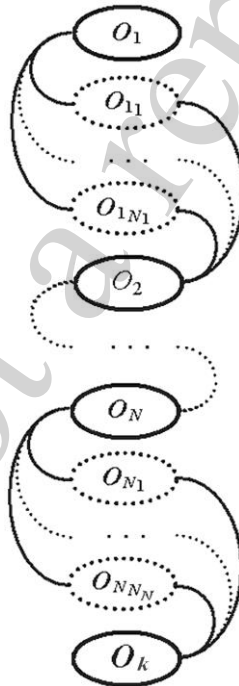
a



b



в



г

Рис. 1. Компоненти структурно-параметричної моделі об'єкта O :
a – матриця суміжності різновидів елементів o_n та o_m ; *b* – граф структури;
в – граф варіантів; *г* – приклад графа синтезу об'єкта O

У результаті використання залежностей (10)–(13) модельований об'єкт O подається множиною проектних варіантів

$$O = (O_k)_1^{N_O}. \quad (14)$$

Формулі (14) відповідає рис. 1, в. На рис. 1, з наведено один із можливих порядків синтезу об'єкта O , що розглядається. Вершинами поданого неорієнтованого графа є елементи опрацьовуваної фігури згідно з виразом (10), а ребра – геометричні моделі (11), які реалізують дані елементи з певними значеннями параметрів (12). Кожний різновид O_k досліджуваного об'єкта являє собою простий елементарний ланцюг із початком у вершині O_1 та кінцем у вершині O_N , загальна їх кількість N_O визначається елементами матриць (13). Величинам параметрів (12) та їх багатоманітним комбінаціям у вигляді потрібних цільових аналітичних функцій ставляться у відповідність довжини належних ребер. Тоді пошук оптимального структурно-параметричного варіанта технічного об'єкта O зводиться до визначення екстремального ланцюга в показаному на рис. 1, з графі. Для розв'язування таких задач існують різні алгоритми, зокрема, індексації вершин, гілок і границь та ін.

Спираючись на те, що змінюваними в часі геометричними об'єктами можна відтворювати певні технологічні процеси машинобудування, в напрацьованій методиці пропонується поєднати подані формулами (1)–(9) геометричні фігури, їх параметри та динамічні модифікації з окресленими співвідношеннями (10)–(14) компонентами структурно-параметричних моделей.

Для варіантного динамічного відтворення технічних об'єктів та процесів їх виготовлення конкретний склад множин (1)–(14) визначається наявними умовами проектування, що проілюстровані далі конкретними прикладами структурно-параметричного геометричного моделювання крила літака.

5. Результати варіантного динамічного геометричного моделювання крила літака

Далі наведено варіантне моделювання поверхні крила, яка значною мірою визначає такі характеристики літака як аеродинамічні, міцності, вагові, технологічні і т. д., а також виконано комп'ютерне динамічне структурно-параметричне формоутворення лонжерона центроплана.

Зазначена інформація важлива у прикладному науковому плані, оскільки на основі використання сучасних комп'ютерних інформаційних технологій забезпечує можливість підвищення ефективності проведення комплексної (багатокритеріальної) оптимізації літака. Дане твердження спирається на той факт, що задачі аеродинаміки, міцності, компоновання, конструкції, технології виготовлення та експлуатації і т. д. не тільки тісно пов'язані поміж собою, а й значним чином впливають одна на одну. Наприклад, допустимі з точки зору міцності обмеження на варіювання висот лонжеронів визначаються формою та розмірами поперечних перерізів крила, що обираються відповідно до потрібних аеродинамічних характеристик, а останні, у свою чергу значною мірою залежать від жорсткості конструкції несучої поверхні. Також ускладнення форми крила призводить до покращення його аеродинаміки, але погіршує технологічність виготовлення. Ці та інші особливості обумовлюють ітераційний варіант-

ний характер проектування сучасного літака. Серед багатьох інших його моделей (аеродинамічних, міцності, компоновання, вагових, технологічних, експлуатаційний тощо) геометричним моделям належить особливе місце, що пов'язане з виконанням ролі еталона форми та розмірів модельованого технічного об'єкта. Унаслідок цього основними вимогами до комп'ютерних геометричних моделей є не тільки забезпечення високої точності формоутворення, а і гнучкої та продуктивної побудови різноманітних проектних варіантів виробів із динамічним відображенням процесів їх виготовлення та експлуатації включно, тобто для всього життєвого циклу.

Подані далі конкретні приклади підтверджують достовірність викладеної вище загальної методики комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів на засадах структурно-параметричного геометричного моделювання.

5. 1. Варіантна побудова поверхні крила літака

Нехай для поверхні в якості вихідного маємо аеродинамічний профіль, представлений у прямокутній системі координат Oxy множиною точок

$$\mathbf{r} = (x_i, y_{e_i}, y_{n_i})_1^n, \quad (15)$$

де x_i – абсциси точок, y_{e_i} та y_{n_i} – відповідно ординати верхньої та нижньої частини профілю, n – число точок у кожній частині.

Зазвичай абсциси x_i , ординати y_{e_i} та y_{n_i} наводяться у процентах від довжини хорди b , тобто відрізка прямої, який поєднує дві найвіддаленіші точки профілю й поділяє його на верхню та нижню частини.

Згідно з виразом (3) можливими модифікаціями профілю (15) є змінювання положення, пропорційне та непропорційне масштабування. Останнє подано далі на прикладі динамічного варіювання товщиною й угнутістю профілю.

Висота профілю та середня лінія розраховується як

$$h_i = y_{e_i} - y_{n_i}, \quad y_{cp_i} = 0,5(y_{e_i} + y_{n_i}). \quad (16)$$

Найбільший відрізок h_i називається товщиною c профілю, а максимальна з відстаней від точок y_{cp_i} до хорди – угнутістю f профілю (рис. 2).

Щоб здійснити модифікацію профілю з коефіцієнтом угнутості k_f і коефіцієнтом товщини k_c

$$k_f = f' / f, \quad k_c = c' / c, \quad (17)$$

де f' та c' – нова угнутість та нова товщина, до вихідних точок (15) застосовуються перетворення

$$\begin{aligned}
 y'_{e_i} &= y_{cp_i} k_f + 0,5h_i k_c = 0,5 \left(y_{e_i} (k_f + k_c) + y_{n_i} (k_f - k_c) \right), \\
 y'_{n_i} &= y_{cp_i} k_f - 0,5h_i k_c = 0,5 \left(y_{e_i} (k_f - k_c) + y_{n_i} (k_f + k_c) \right),
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

де y'_{e_i} та y'_{n_i} – модифіковані ординати точок верхньої та нижньої частин аеродинамічного профілю.

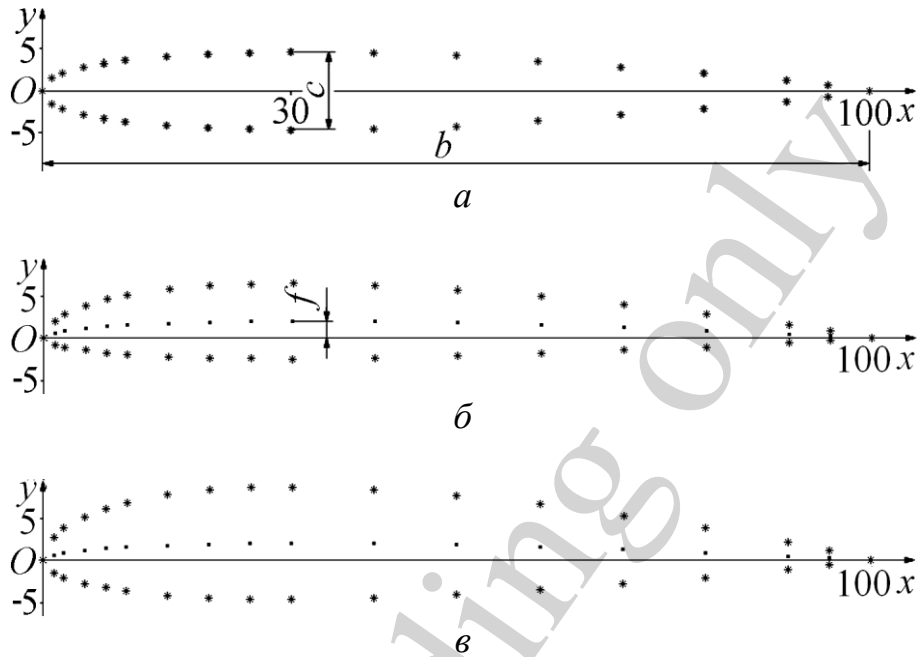


Рис. 2. Модифікації форми дискретного аеродинамічного профілю:
a – вихідний профіль НАСА-0009 ($f=0\%$, $c=9\%$); *б* – $f=2\%$, $c=9\%$;
в – $f=2\%$, $c=13,5\%$

За умов використання вихідного симетричного профілю потрібна початкова угнутість f реалізується множенням ординат точок верхньої та нижньої частин відповідно на коефіцієнти

$$k_g = (f + 0,5c) / y_{e_{max}}, \quad k_n = (f - 0,5c) / y_{n_{min}},
 \tag{19}$$

де $y_{e_{max}}$ та $y_{n_{min}}$ – максимальна та мінімальна ординати вихідного профілю.

Зображення рис. 2 ілюструють практичне застосування формул (15)–(19).

У випадку опрацювання ліній, наприклад вигляду Φ_{1_2} згідно з виразом (5), можливі динамічні перетворення показано на рис. 3, де досліджуваний аеродинамічний профіль подано у вигляді складеної лінії з дуг кривих другого порядку у векторній параметричній формі

$$\mathbf{r}_{ij}(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_{0ij} + w_{1ij} 2u(1-u) \mathbf{r}_{1ij} + u^2 \mathbf{r}_{2ij}}{(1-u)^2 + w_{1ij} 2u(1-u) + u^2},
 \tag{20}$$

де $i \in \{в, н\}$; $j \in \{1, 2\}$; $\mathbf{r}_{0_{ij}} = (x_{0_{ij}}, y_{0_{ij}})$, $\mathbf{r}_{1_{ij}} = (x_{1_{ij}}, y_{1_{ij}})$, $\mathbf{r}_{2_{ij}} = (x_{2_{ij}}, y_{2_{ij}})$ – радіус-вектори вершин характеристичних трикутників у прямокутній системі координат Oxy ; $w_{1_{ij}} \geq 0$ – вагові коефіцієнти вершин $\mathbf{r}_{1_{ij}}$; $u \in [0, 1]$ – параметр.

У виразі (20) через v та n позначено верхню та нижню частини профілю, а індексом j – порядкові номери їх дуг, що з'єднані в точці з абсцисою максимальної товщини. На рис. 3 наведено варіанти модифікацій, де використано вагові коефіцієнти 0,5 та 1 відповідно для носової та хвостової частини профілю.

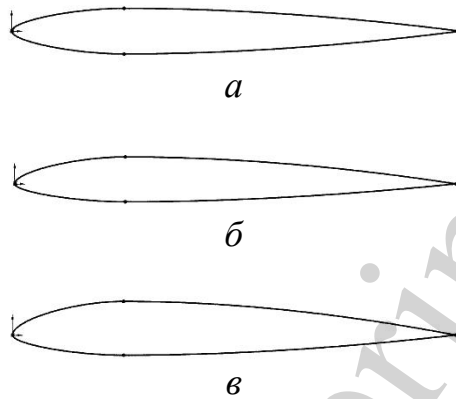


Рис. 3. Модифікації аеродинамічного профілю з кривих другого порядку:
 a – вихідний профіль ($f=0\%$, $c=10\%$); $б$ – $f=1\%$, $c=10\%$;
 $в$ – $f=1,5\%$ та $c=12\%$ ($k_f=1,5$; $k_c=1,2$)

Після дефініції форми аеродинамічного профілю здійснюється його пропорційне масштабування до потрібних розмірів та встановлення в належне положення. Рис. 4 ілюструє визначену у прямокутній системі координат $Oxyz$ лінійну поверхню стрілоподібного крила, основними геометричними параметрами якої є коренева b_0 та кінцева b_k хорди, розмах L та кут стрілоподібності χ . Похідними характеристиками постають площа $S=b_{cp}L$, де $b_{cp}=0,5(b_0+b_k)$ – середня хорда, видовження $\lambda=L/b_{cp}=L^2/S$, звуження $\eta=b_0/b_k$.

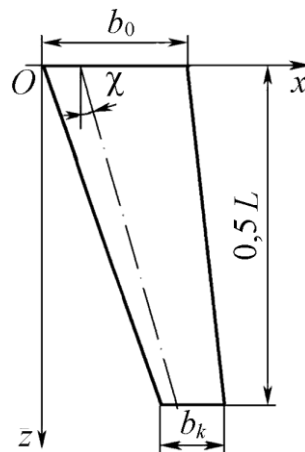


Рис. 4. Вигляд крила у плані

Параметричне рівняння поверхні крила

$$\mathbf{r}_{ij}(u, v) = (1 - v)\mathbf{r}_{ij}^0(u) + v\mathbf{r}_{ij}^k(u), \quad (21)$$

де $i \in \{в, н\}; j \in \{1, 2\}; u \in [0, 1], v \in [0, 1]$ – параметри.

Використання індексів i та j у формулі (21) аналогічне виразу (20), а верхніми індексами 0 та k позначено кореневий та кінцевий аеродинамічні профілі.

5. 2. Динамічне комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання лонжерона центроплана крила літака

Наведена у праці [10] структурно-параметрична модель лонжерона дає змогу отримувати потрібні варіанти конструкції, але не дозволяє відтворювати в часі технологічні операції встановлення деталей, свердління отворів, клепа́ння тощо. Розглянемо деякі прийоми удосконалення цієї моделі.

Склад проектованого лонжерона ЛН подамо множиною

$$\text{ЛН} = (\text{ЛН}_i)_1^4, \quad (22)$$

де $\text{ЛН}_1 = \{\text{СТ}\}$ – стінка; $\text{ЛН}_2 = \{\text{ПС}_1, \text{ПС}_2\}$ – пояс верхній і нижній; $\text{ЛН}_3 = (\text{СТ}_j)_1^{N_{\text{ЛН}_3}}$ – стояки; $\text{ЛН}_4 = (\text{Зк}_j)_1^{N_{\text{ЛН}_4}}$ – заклепки.

Нехай виготовлення вузла (22) визначає кортеж технологічних операцій

$$T = (T_i)_1^5, \quad (23)$$

де $T_1 = \{\text{Установити СТ, ПС}_1, \text{ПС}_2\}$; $T_2 = \{\text{Свердлити, клепати ПС}_1, \text{ПС}_2\}$; $T_3 = \{\text{Установити СТ}_j, j = 1 \dots N_{\text{ЛН}_3}\}$; $T_4 = \{\text{Свердлити, клепати СТ}_j, j = 1 \dots N_{\text{ЛН}_3}\}$; $T_5 = \{\text{Контроль складання ЛН}\}$.

Згідно з викладеним загальним підходом застосовуваними фігурами (22) є тіла, а технологічні операції (23), з геометричної точки зору, зводяться до змінування параметрів положення та форми цих об'єктів.

На рис. 5 (за допомогою виду спереду та зліва) показано результат виконання операції T_1 .

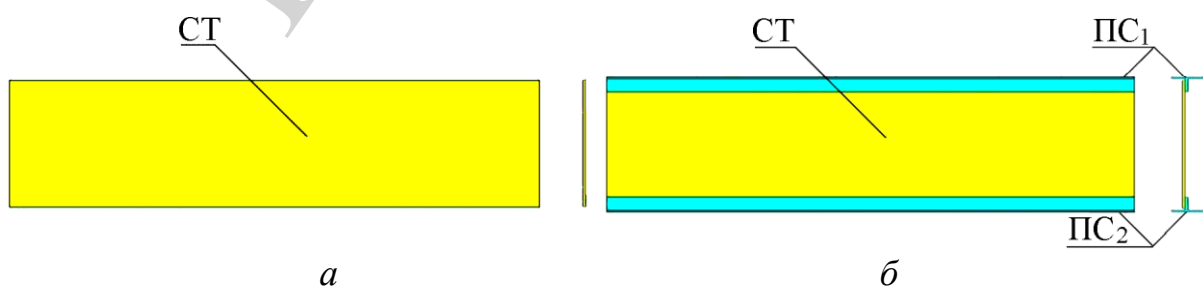


Рис. 5. Установлення стінки та поясів лонжерона центроплана:
а – стінка; б – верхній і нижній пояс

Параметрами стінки СТ, як прямокутного паралелепіпеда, є довжина, висота та товщина. Для таврових поясів ПС₁ і ПС₂ – це розміри поперечних перерізів та довжина. Операція встановлення цих деталей полягає в переміщенні в необхідне положення з потрібним базуванням, яке для тіл може здійснюватися спряженням граней, ребер, вершин тощо.

Операцію T₂ ілюструє рис. 6, де пояси до стінки лонжерона кріпляться шляхом свердління необхідних отворів та подальшим клепаанням.

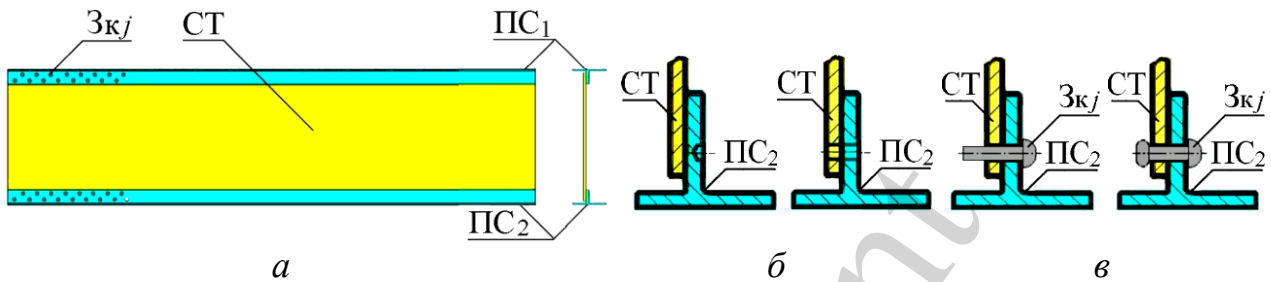


Рис. 6. Технологічна операція T₂ свердління та клепаання поясів ПС₁ і ПС₂:
a – загальний вид; *б* – початок і завершення свердління отвору;
в – початок і завершення клепаання

Для динамічного відтворення свердління циліндричних отворів рекомендується комплексно застосовувати комп'ютерну твердотільну модель свердла та його геометричну модель, подану в декартовій системі координат $Oxyz$ як комбінація конуса

$$r(x, y, z) = r\left(\left(\left(1 - w\right)\frac{D}{2}\right)v\cos(2\pi u), \left(\left(1 - w\right)\frac{D}{2}\right)v\sin(2\pi u), wH\right), \quad (24)$$

та прямого кругового циліндра

$$\mathbf{r}(x, y, z) = \mathbf{r}\left(\frac{D}{2}v\cos(2\pi u), \frac{D}{2}v\sin(2\pi u), wH\right), \quad (25)$$

де D – діаметр основи; H – висота; $u \in [0, 1]$, $v \in [0, 1]$, $w \in [0, 1]$ – параметри.

Вирази (24, 25) визначають частину простору, яку займає свердло при своєму обертанні. Під час робочого ходу свердло переміщується і врізається в деталь. З геометричної точки зору це означає булеву операцію віднімання від деталі належного рухомого об'єму свердла.

Для комп'ютерних динамічних побудов замикаючих головок заклепок використовуватимемо геометричну модель осаджування прямого кругового циліндра, яку показано на рис. 7.

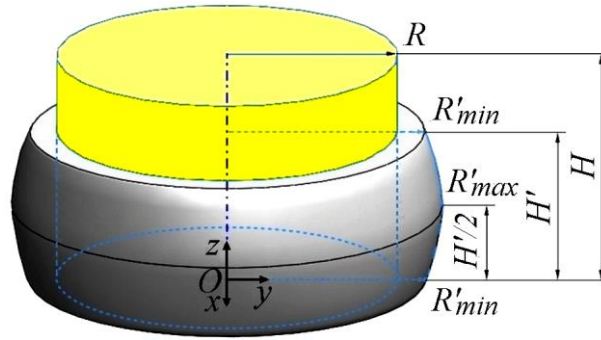


Рис. 7. Модель осаджування циліндра

Вихідний циліндр має радіус основи R та висоту H . Для осадженого тіла відносно обтискання

$$\varepsilon = (H - H') / H, \quad (26)$$

де H' – зменшена висота, R'_{\min} і R'_{\max} – збільшені радіуси основ у контактних площинах і серединній горизонтальній площині симетрії.

Нижня та верхня частини бічної поверхні осадженого тіла, які симетричні відносно серединної горизонтальної площини, формуються у прямокутній системі координат $Oxyz$ обертанням навколо осі z дуг кривих другого порядку

$$\mathbf{r}_i(u) = \frac{(1-u)^2 \mathbf{r}_{0i} + w_1 2u(1-u) \mathbf{r}_{1i} + u^2 \mathbf{r}_{2i}}{(1-u)^2 + w_1 2u(1-u) + u^2}, \quad (27)$$

де $i \in \{н, в\}$ – індекси нижньої та верхньої частин; $\mathbf{r}_{0н} = (0, R'_{\min}, 0)$, $\mathbf{r}_{1н} = (0, R'_{\max}, 0)$, $\mathbf{r}_{2н} = (0, R'_{\max}, H'/2)$, $\mathbf{r}_{0в} = (0, R'_{\max}, H'/2)$, $\mathbf{r}_{1в} = (0, R'_{\max}, H')$, $\mathbf{r}_{2в} = (0, R'_{\min}, H')$ – радіус-вектори вершин характеристичних трикутників; $w_1 \geq 0$ – ваговий коефіцієнт вершин \mathbf{r}_{1i} ; $u \in [0, 1]$ – параметр.

Під час пластичного деформування тіла його об'єм вважається сталим і розраховується як

$$\begin{aligned} V &= 2 \cdot \pi \int_0^{H'/2} y(z)^2 dz = 2 \cdot \pi \int_0^1 y(u)^2 \dot{z}(u) du = \\ &= 2 \cdot \pi \int_0^1 \frac{\left((1-u)^2 R'_{\min} + \left((1-2w_1)u^2 + 2w_1u \right) R'_{\max} \right)^2 u(1-u+w_1u) H'}{\left((1-u)^2 + 2w_1(1-u)u + u^2 \right)^4} du. \end{aligned} \quad (28)$$

Для наявних даних про відносні обтискання ε та відповідні значення радіусів R'_{\min} і R'_{\max} потрібний об'єм V деформованого тіла забезпечується величинами вагових коефіцієнтів w_1 , що обчислюються мінімізацією функції

$$F(w_1) = |\pi R^2 H - V(w_1)|, \quad (29)$$

екстремальне значення якої дорівнює нулю.

Отже, вирази (26)–(29) становлять математичну основу комп'ютерних динамічних побудов замикаючих головок заклепок.

З формули (23) видно, що наступними операціями є встановлення, свердління та клепаання стояків (рис. 8). Ці дії багато в чому схожі на проаналізовані вище для поясів.

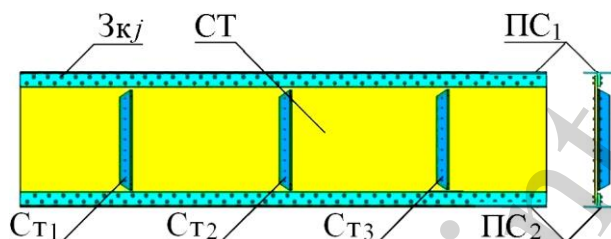


Рис. 8. Операції T_3 та T_4 встановлення, свердління та клепаання стояків

Завершальним є контроль T_5 виготовлення лонжерона, що може полягати в перевірці складу отриманого вузла, правильності значень параметрів форми, розмірів та положення його елементів і т. д.

6. Обговорення результатів запропонованої методики комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів на прикладі крила літака

Розроблений математичний апарат динамічного формоутворення технічних об'єктів, який спрямований на удосконалення та подальший розвиток комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей шляхом відповідної інтеграції з наявним їх математичним забезпеченням. У цьому полягає основна наукова теоретична новизна одержаних результатів.

Практичне значення мають виконані автоматизовані варіантні побудови поверхні крила літака та динамічне твердотільне моделювання лонжерона центроплана, які підтвердили достовірність запропонованої методики комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів на засадах структурно-параметричного підходу. Це стосується класифікації застосовуваних геометричних фігур та їх модифікацій, поєднання етапів ескізного, технічного та робочого проектування, відтворення деяких технологічних процесів машинобудування.

Обумовлене суперечливими вимогами з боку аеродинаміки, міцності, виробництва та експлуатації варіювання формою, розмірами й положенням аеродинамічних профілів проектованого крила реалізоване гнучкими засобами. Подані прийоми комп'ютерних побудов спрямовані на забезпечення успішного проведення відповідної багатокритеріальної оптимізації. Так наявність у моделі (рис. 4) можливості паралельного перенесення кінцевого профілю r^k вздовж осі

z визначає потрібний розмах L крила, вздовж осі x – кут стрілоподібності χ , а вздовж осі y – кут поперечного V . Поворот профілю навколо паралельної осі z прямої надає несучій поверхні необхідний скрут. Підкреслимо також варіантний характер створеної моделі лонжерона крила. Кожному елементу притаманні свої геометричні параметри форми, розмірів і положення. Наприклад, за поперечним перерізом стояки можуть бути не тільки кутковими (рис. 8), а й тавровими і т. д., мати певні розміри та необхідну кількість, розташовуватися належним чином.

Отже, принципово новими особливостями запропонованих динамічних структурно-параметричних геометричних моделей є наявність у них параметрів, пов'язаних із переміщенням та деформуванням складових елементів.

Відомо, що розробка складних технічних об'єктів, зокрема в авіаційній галузі, має ітераційний варіантний характер. Так під час технічного завдання визначаються основні характеристики виробу, обґрунтовується можливість і доцільність його створення. Технічна пропозиція містить уточнені техніко-економічні характеристики, ескізний проект – принципові інженерні розв'язки, що дають загальне уявлення про будову та функціонування виробу, а технічний проект – остаточні технічні рішення, які дають повне уявлення про виріб. В авіаційній галузі на стадії ескізного та технічного проекту виготовляють різноманітні макети створюваного технічного об'єкта та його компонентів, які нині доволі часто виконують у комп'ютерному вигляді. У процесі робочого проектування спочатку формують документацію для виготовлення дослідних зразків, а потім, після належного коригування після випробувань, і серійної продукції.

На всіх перерахованих вище стадіях створення технічних об'єктів застосовуються геометричні моделі, які поступово ускладнюються та уточнюються відповідно до етапів життєвого циклу продукції машинобудування.

Прийоми та алгоритми структурно-параметричного геометричного моделювання впроваджені на Авіаційному науково-технічному комплексі ім. О.К. Антонова під час проектування літака АН-148, виготовлення тролейбуса К12 на Державному підприємстві Київський авіаційний завод «АВІАНТ», виконання розрахунково-конструкторських робіт для виготовлення технологічного оснащення на Харківському авіаційному виробничому підприємстві, розробці системи автоматизації процесів формування тривимірної моделі корпусу судна у Відкритому акціонерному товаристві «Науково-дослідний інститут автоматизованих систем та інформатики в суднобудуванні» та інших провідних підприємствах України.

Перспективними напрямками сучасного розвитку структурно-параметричного геометричного моделювання в науковому та практичному аспекті є подальше його удосконалення шляхом розробки нових способів, прийомів та алгоритмів динамічного формоутворення, що суттєво підвищує точність та реалістичність зазначених комп'ютерних моделей. Деякі з окреслених питань опрацьовані в даній статті запропонованою методикою комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення технічних об'єктів, яку проілюстровано на прикладі крила літака.

7. Висновки

1. Наукова теоретична новизна одержаних результатів полягає в розробці математичного апарату динамічного формоутворення технічних об'єктів, який спрямований на удосконалення та подальший розвиток комп'ютерних структурно-параметричних геометричних моделей шляхом відповідної інтеграції з наявним їх математичним забезпеченням.

2. Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні методики застосування структурно-параметричного геометричного моделювання для комп'ютерного варіантного динамічного формоутворення, яка дозволяє гнучко поєднувати процеси проектування та виготовлення технічних об'єктів.

3. Отримані практичні результати підтвердили, що запропоновані прийоми автоматизованих побудов забезпечують інтегроване опрацювання технологічних процесів, які використовуються під час виготовлення авіаційних виробів.

4. Подані матеріали можуть бути поширені на різноманітну продукцію машинобудування та інших галузей промисловості.

Література

1. Ketul, B. B. Parametric modelling of Oldham coupling [Text] / B. B. Ketul, M. P. Dipal, K. S. Nirmal // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 2. – P. 9120–9125.

2. Popescu, D. I. Design Configuration under Parametric Control [Text] / D. I. Popescu, L. Chioltean // Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics. – 2013. – Vol. 58, Issue 72. – P. 67–70.

3. Pomazan, V. Assembly Top Down Design in Parametric CAD [Text] / V. Pomazan // Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics. – 2013. – Vol. 58, Issue 72. – P. 153–156.

4. Sun, W. Study on Parametric Modeling Based on Visual Optimization Design of Mechanical Product [Text] / W. Sun, H. Ma, C. Li, B. Wen // 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. – 2009. doi: 10.1109/icit.2009.304

5. Gavrilă, C. C. 3D modeling, fem analysis and detail design for a testing device with spherical joint [Text] / C. C. Gavrilă // Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering. – 2016. – Vol. XXV (XV), 2016/1, Issue 1. – 2016. doi: 10.15660/auofmte.2016-1.3201

6. Ванін, В. В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання [Текст] / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2009. – № 23. – С. 42–48.

7. Ванін, В. В. Структурно-параметричні геометричні моделі як засіб інтеграції автоматизованого проектування сучасного літака [Текст] / В. В. Ванін, Г. А. Вірченко // Вісник Херсонського нац. техн. ун-ту. – 2014. – № 3. – С. 571–574.

8. Taras, I. P. Computer combinatorial-variation geometric modeling of engineering objects [Text] / I. P. Taras, V. G. Virchenko // Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics. – 2013. – Vol. 58, Issue 72. – P. 173–176.

9. Ванін, В. В. Варіантне моделювання геометричних об'єктів методом поліпараметризації [Текст] / В. В. Ванін, Г. І. Вірченко, С. Г. Вірченко // Проблеми інформаційних технологій. – 2014. – № 2. – С. 76–79.

10. Шамбина, С. Л. Модульное вариантное геометрическое моделирование сложных технических объектов [Текст] / С. Л. Шамбина, В. Г. Вірченко // Вестник Российского университета дружбы народов. – 2013. – № 2. – С. 5–8.

For reading only