

УДК 621.7/9:004.946

doi: 10.32620/akt.2020.4.09

С. І. ПЛАНКОВСЬКИЙ¹, Є. В. ЦЕГЕЛЬНИК¹, В. Б. МИНТЮК¹,
С. М. ЗАДОРЖНИЙ², В. В. КОМБАРОВ^{1,3}

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків

² ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство», Харків

³ ТОВ НВФ «ХАІ-Інжиніринг», Харків

МЕТОД ВІРТУАЛЬНОГО БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФОРМОЮ, НАБЛИЖЕНОЮ ДО ФОРМИ ЗАГОТОВОК

Предметом вивчення в статті є процеси віртуального базування деталей при адаптивному механічному обробленні деталей складної форми. *Метою* є розроблення ефективного методу пошуку стартового розташування САД моделі деталі при віртуальному базуванні усередині хмари точок, отриманих лазерним скануванням заготовки. *Завдання:* формалізувати процедуру стартового розташування моделі деталі при як першого етапу процесу віртуального базування. На другому етапі для остаточного базування запропоновано використовувати ітераційні алгоритми з цільовою функцією, чутливою до перетинання поверхонь деталі та заготовки. При розв'язанні задачі стартового розташування використано інструменти, доступні в сучасних САД пакетах та засобах тривимірного сканування. Використовуваними *методами* є методи матричної алгебри, зокрема методика пошуку головних центральних моментів інерції тривимірних об'єктів на основі тензора інерції. Отримано такі *результати*. При обчисленні компонент тензорів інерції запропоновано використовувати дані тривимірного сканування заготовки та геометричну інформацію щодо деталі з САД системи. В результаті отримано алгоритм стартового розташування САД моделі деталі при віртуальному базуванні, який у випадку заготовок з припуском близьким до рівномірного може забезпечувати достатньо точне базування деталі для задач адаптивного механооброблення. Показано, що для мінімізації обчислювальних похибок та забезпечення задовільної точності базування запропонований алгоритм може потребувати декількох ітерацій пошуку вектора зсуву моделі. *Висновки.* Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: на відміну від раніш застосовуваних підходів, які при розв'язанні задачі віртуального базування для стартового розташування використовували умову співпадіння центрів ваги тонких оболонок, які співпадають з поверхнями заготовки та деталі, запропоновано додатково забезпечити суміщення головних центральних осей інерції цих оболонок, що у випадку деталей, наближених до форми заготовок забезпечує точність базування, яка може не потребувати додаткових ітераційних процедур.

Ключові слова: адаптивне механічне оброблення; віртуальне базування; тривимірне сканування; алгоритмізація у САД системі.

Вступ

Незважаючи на зростання застосування композиційних матеріалів у конструкціях сучасних літаків металеві сплави досі є незамінними при для деталей з підвищеними вимогами до міцності, втомної довговічності, абразивного зношення [1, 2]. Завдяки розвитку інтегрованих САД/САМ систем та прогресу обладнання з ЧПК основним способом виготовлення таких деталей стало механічне оброблення [3]. Подальше підвищення її ефективності в умовах переходу до індустрії 4.0 більшість дослідників пов'язують з впровадженням інтелектуального оброблення [4, 5].

В огляді сучасних технологій виготовлення структурних елементів літаків [6] відзначається, що основними напрямками підвищення продуктивності та економічної ефективності при застосуванні механічного оброблення є впровадження адаптивних

технологій з автоматичною корекцією програм ЧПК за даними про реальні режими різання та розташування заготовки в системі координат верстата.

При обробленні деталей складної форми та великих габаритів, що є характерним для монолітних деталей силового каркасу літаків, часто простіше пристосувати траєкторію інструмента під наявний технологічний установ, ніж зорієнтувати заготовку в системі координат верстата. При цьому САД модель розташовується усередині заготовки у цифровому просторі, тобто проводиться її віртуальне базування. Після цього програма ЧПК оброблення деталі, яка формується в системі координат САД може бути переведена в систему координат верстата [7, 8].

Існуючі алгоритми віртуального базування в більшості випадків не повною мірою враховують особливості задачі базування високоточних заготовок при механічному обробленні [9]. Це залишає задачу віртуального базування об'єктів складної

форми складним актуальним завданням [10].

Метою даної роботи є розроблення ефективного алгоритму визначення стартового розташування моделі деталі при віртуальному базуванні з використанням інструментів як CAD системи, так і засобів тривимірного сканування.

Сучасні підходи до розв'язання задач віртуального базування

Задача співставлення або суміщення геометричних об'єктів (хмар точок, поверхонь, кривих) виникають в багатьох практичних випадках: задачах комп'ютерного зору, зшивки зображень, отриманих з різних камер або під різними кутами при тривимірному скануванні, контролі поверхонь складної форми, комп'ютерній анімації та ін. Серед таких методів виділяється ітераційний алгоритм найближчих точок (ICP), запропонований в роботі [11]. Критерієм оптимального взаємного розташування геометричних об'єктів в цьому методі є мінімізація суми квадратів відстаней між їхніми елементами (відстаней між точками, точками та кривими, точками та поверхнями та ін.). Стосовно до суміщення двох хмар точок $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$ та $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ у скінченно-вимірному дійсному просторі \mathcal{R}^T ICP алгоритм містить чотири етапи.

1. Пошук пари τ_j з хмари T для кожної з точок s_i хмари S з умови:

$$F(\tau) = \|\tau_j - s_i\|, \quad (\tau) = \arg \min_{s_i \in S, \tau_j \in T} F(\tau).$$

2. Визначення вектору зміщення \mathbf{t} та матриці повороту \mathbf{R} для переміщення трансформованої хмари точок S виходячи з умови:

$$\mathfrak{Z}(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|(R s_i + \mathbf{t}) - \tau_i\|^2,$$

$$(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \arg \min_{\mathbf{R} \in \text{SO}(3), \mathbf{t} \in \mathcal{R}^3} \mathfrak{Z}(\mathbf{R}, \mathbf{t}).$$

3. Перетворення трансформованої хмари точок $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ за допомогою визначеної матриці повороту \mathbf{R} та вектору зміщення \mathbf{t} в нову хмару точок $s_i = \mathbf{R} s_i + \mathbf{t}$.

4. Повторення усього ітераційного процесу алгоритму доти поки $\mathfrak{Z}(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \geq \varepsilon$, де на кожній наступній ітерації як трансформована хмара точок використовується та, яка отримана на попередньому етапі.

В роботі [11] було розглянуто модифікації ICP алгоритму для випадків коли геометричні дані задано у вигляді: набору лінійних сегментів (поліліній); неявних кривих $\vec{g}(x, y, z) = 0$; параметричних кри-

вих $(x(u), y(u), z(u))$; набору трикутників (фасеточних поверхонь); неявних поверхонь $g(x, y, z)$; параметричних поверхонь $(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$.

В роботі [11] відзначається, що за результатами числових експериментів зазвичай спостерігається швидка збіжність алгоритму на кількох перших ітераціях, яка сповільнюється, коли розв'язок наближається до локального мінімуму. Але навіть при сповільненні збіжності у проміжку від 30 до 50 ітерацій середня квадратична похибка зазвичай складає $\sim 0,1\%$ від габариту моделі.

Недоліком методу ICP є те, що функціонал, мінімізація якого проводиться при пошуку розв'язку, може мати багато локальних мінімумів [12], що інколи призводить до неможливості отримання коректного результату.

Характерний приклад такого випадку представлено у роботі [13] (рис. 1). Тому для надійного отримання розв'язку мають бути прийняті заходи для уникнення таких ситуацій. На практиці це зазвичай потребує щоб перед застосуванням методу ICP порівнювані поверхні були розташовані досить близько одна від одної. Для цього потрібне попереднє оброблення геометричних даних.

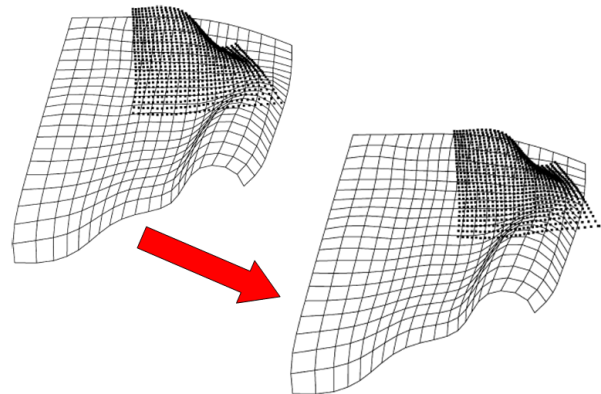


Рис. 1. Приклад некоректного розв'язку задачі суміщення хмари точок та проектної поверхні при застосуванні методу ICP [13] (показане початкове та кінцеве розташування хмари точок відносно до проектної поверхні)

В роботі [11] в якості початкового розташування трансформованого об'єкта було запропоновано суміщення центрів ваги об'єктів, що суміщаються (поверхонь чи кривих з одиничною густиною та точок з одиничною масою) та відзначалося, що такий підхід дозволяє лише несуттєво скоротити кількість ітерацій, необхідних для пошуку розв'язку.

В роботах [14, 15] розглядався випадок суміщення однакових хмар точок з координатами, заданими в різних системах координат.

В роботі [14] для пошуку оптимального повороту для суміщення хмар використовувався одинич-

ний кватерніон, у роботі [15] для цього використувався більш розповсюджений підхід з використанням матриць обертання. У обох випадках розв'язання задачі потребувало оперування з матрицею \mathbf{M} , яка мала вигляд:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix},$$

де $S_{xx} = \sum_{i=1}^N x_{r,i} x_{l,i}$, $S_{xy} = \sum_{i=1}^N x_{r,i} y_{l,i}$ і т.д., а індекси

r та l позначають «ліву» та «праву» системи координат в яких розглядалася хмара точок.

Обсяг обчислень за алгоритмом ICP залежить від часу визначення найближчих точок і часу знаходження вектору зміщення та матриць повороту і становить $O(N_s \times N_t)$ для N точок з хмар S і T , тобто складає $O(N^2)$ при однаковій кількості точок в хмарах.

У випадку віртуального базування деталей при механічному обробленні геометрична інформація щодо заготовки часто отримується засобами тривимірного сканування, а щодо моделі деталі – у вигляді файлу у STL форматі. Цей формат перетворює деталь у фасеточну поверхню з трикутними гранями. Кількість точок у хмарі, одержаній скануванням і граней у моделі деталі в залежності від бажаної точності може складати десятки або навіть сотні тисяч, тому зменшення обчислюваних витрат при віртуальному базуванні є важливим фактором.

Відомі численні модифікації ICP алгоритму, спрямовані на підвищення його обчислювальної ефективності. Підходи на основі бінарного $k-d$ дерева [16] скорочує кількість обчислювань на декілька порядків та складає $O(N_s \times \log N_t)$. Прискорений $k-d$ алгоритм, запропонований в роботі [17] додатково зменшує кількість обчислювань і є приблизно на 50 % швидшим, ніж звичайний $k-d$ ICP алгоритм.

У деяких роботах для підвищення збіжності результатів використовувалось декілька випадкових початкових вибірок з хмари точок, отриманих шляхом тривимірного сканування [18]. Пошук ефективних модифікацій ICP, яких нараховується вже більш ніж 600, не припиняється [19, 20].

Крім алгоритмів ICP, було запропоновано кілька абсолютно інших методів [21]. Тим не менш на сьогоднішній день алгоритм ICP по суті є базовим стандартом для задач суміщення геометричних об'єктів.

Недоліком ICP методів стосовно до задачі віртуального базування є застосування критерію мінімізації середнього значення квадрату відстані між

хмарою точок вимірювання та проектною поверхнею. Це призводить до нечутливості до того де саме по відношенню до CAD поверхні знаходиться точки з трансформованої хмари – усередині чи ззовні CAD моделі.

З точки зору задачі віртуального базування є перспективним застосування методу множників Лагранжа [22]. Крім того слід виділити роботи [9, 23], в яких при суміщенні запропоновано мінімізувати функціонал

$$U = \max[d_i] + U_P,$$

де d_i – відстань між точкою з хмари, отриманої вимірюванням до поверхні CAD моделі; U_P – штрафна функція, наприклад:

$$U_P = \sum_{i=1}^N 1 \times 10^{(c+b \cdot d_i)} \times [d_{0i}^2].$$

При відповідному виборі коефіцієнтів штрафної функції вона набуває властивостей, які дозволяють «виштовхувати» точки з хмари назовні області CAD моделі.

Таким чином задачу віртуального базування доцільно розв'язувати в два етапи. На першому необхідно найкраще визначити стартове розташування CAD моделі всередині заготовки. На другому за допомогою мінімальної кількості ітерацій визначити остаточне положення системи координат CAD моделі відносно до системи координат верстата.

Алгоритм пошуку стартового розташування при віртуальному базуванні

Задачу встановлення стартового розташування будемо розглядати в постановці подібній тій, яку було застосовано в роботі [15]. Для цього попередньо розглянемо задачу суміщення двох однакових хмар точок, одна з яких отримана з іншою шляхом трансляції та повороту але на відміну від роботи [15] будемо розглядати задачу суміщення хмар точок одиначної маси з координатами виміряними лише в одній системі координат (рис. 2).

Положення точок першої хмари в системі координат задамо радіус-векторами $\{\mathbf{r}_i\}$, положення другої хмари радіус-векторами $\{\mathbf{r}'_i\}$. При цьому відповідно до способу отримання другої хмари точок $\mathbf{r}'_i = \mathbf{R}(\mathbf{r}_i) + \mathbf{r}_0$, де \mathbf{r}_0 – вектор трансляції, а \mathbf{R} – матриця повороту. Задача суміщення хмар точок зводиться до визначення \mathbf{r}_0 та \mathbf{R} . Для цього будемо використовувати цільову функцію

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{r}_{ii'}\|^2 \rightarrow \min, \text{ де } \mathbf{r}_{ii'} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_i.$$

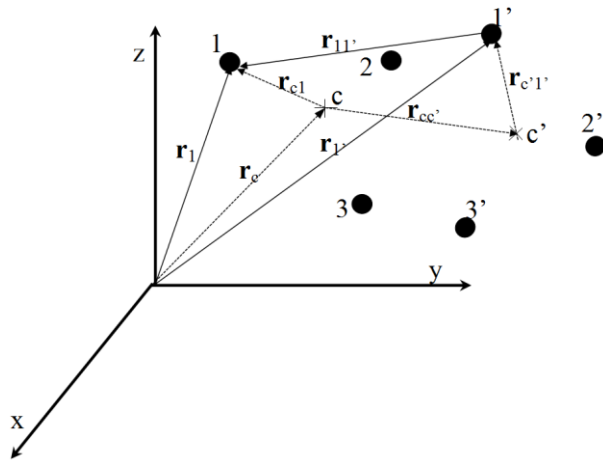


Рис. 2. Схема задачі суміщення двох хмар точок, одна з котрих отримана шляхом зміщення та повороту іншої

Введемо до розгляду радіус-вектори центрів для обох хмар точок:

$$\mathbf{r}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{i1}, \quad \mathbf{r}_{c'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{i'}$$

та переформулюємо цільову функцію у вигляді

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{r}_{ci} - (\mathbf{r}_{cc'} + \mathbf{r}_{c'i'})\|^2 \rightarrow \min.$$

Значимо, що $\sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{ci} = 0$ та $\sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{c'i'} = 0$. З ура-

хуванням цього запишемо цільову функцію у вигляді:

$$\begin{aligned} \Phi &= \sum_{i=1}^N \|\mathbf{r}_{ci} - (\mathbf{r}_{cc'} + \mathbf{r}_{c'i'})\|^2 = 2 \sum_{i=1}^N \|\mathbf{r}_{ci}\|^2 - \\ &- 2\mathbf{r}_{cc'} \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_{ci} - \mathbf{r}_{c'i'}) - 2 \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{ci} \mathbf{r}_{c'i'} + N \sum_{i=1}^N \|\mathbf{r}_{cc'}\|^2 \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Зважаючи на те, що перший доданок у отриманому виразі є константою, другий тотожно дорівнює нулю, а третій не може бути від'ємним можна прийти до висновку, що мінімум цільової функції забезпечується за умов, коли

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{ci} \mathbf{r}_{c'i'} \rightarrow \max \quad \text{та} \quad \|\mathbf{r}_{cc'}\|^2 \equiv 0.$$

Остання умова вимагає співпадіння центрів обох хмар точок. Як вже зазначалося, використання такої умови є відомим, зокрема вона застосовувалась у вже цитованій роботі [11]. Тому поставлена задача суміщення хмар точок зводиться до пошуку матриці повороту R яка забезпечує умову

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{ci} \mathbf{r}_{c'i'} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{ci} R(\mathbf{r}_{ci}) \rightarrow \max.$$

Цей вираз являє собою суму скалярних добутків радіус-векторів точок початкової та трансформованої хмари я досягає максимуму за умови косинуси

кутів між ними стають рівними одиниці, тобто коли ці вектори стають попарно колінеарними. Але замість того, щоб подібно до цитованих вище робіт [14, 15] за координатами точок суміщуваних хмар шукати матрицю повороту R розв'язок задачі будемо шукати виходячи з вимоги співпадання систем координат, які жорстко пов'язані з цими хмарами. Такими системами координат можуть бути головні центральні осі інерції хмар точок.

Направляючі вектори цих осей визначаються як власні вектори тензорів інерції хмар точок:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_x & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_y & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{I}' = \begin{pmatrix} I'_x & I'_{xy} & I'_{xz} \\ I'_{xy} & I'_y & I'_{yz} \\ I'_{xz} & I'_{yz} & I'_z \end{pmatrix},$$

$$I_x = \sum_{i=1}^N (y_i^2 + z_i^2), \quad I_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i, \quad I_{xz} = \sum_{i=1}^N x_i z_i,$$

$$I_y = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + z_i^2), \quad I_z = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2).$$

Власні значення (головні центральні моменти інерції) та власні вектори тензорів інерції хмар знайдемо прирівнявши до нуля детермінанти матриць:

$$\begin{vmatrix} I_x - \lambda & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_y - \lambda & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_z - \lambda \end{vmatrix} = 0,$$

$$\begin{vmatrix} I'_x - \lambda & I'_{xy} & I'_{xz} \\ I'_{xy} & I'_y - \lambda & I'_{yz} \\ I'_{xz} & I'_{yz} & I'_z - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

В результаті отримаємо значення головних центральних моментів інерції та направляючих векторів відповідних осей:

$$\begin{aligned} I_1, \mathbf{v}_1(k_1, l_1, m_1), \quad I_2, \mathbf{v}_2(k_2, l_2, m_2), \\ I_3, \mathbf{v}_3(k_3, l_3, m_3), \\ I'_1, \mathbf{v}'_1(k'_1, l'_1, m'_1), \quad I'_2, \mathbf{v}'_2(k'_2, l'_2, m'_2), \\ I'_3, \mathbf{v}'_3(k'_3, l'_3, m'_3). \end{aligned}$$

Для більшості деталей каркасу літаків головні центральні моменти інерції відрізняються так, що $I_1 > I_2 > I_3$. Таким чином для виконання умові мінімізації цільової функції після суміщення центрів хмар точок трансформована хмара має бути повернута так, щоб для довільної пари векторів виконались умови колінеарності, наприклад $\mathbf{v}_1 \parallel \mathbf{v}'_1$ та $\mathbf{v}_3 \parallel \mathbf{v}'_3$.

Покажемо як здійснити подібні обертання трансформованої хмари на прикладі суміщення осей для максимальних головних моментів інерції. Для цього попередньо визначимо кут між векторами \mathbf{v}_1

та \mathbf{v}'_1 . Скориставшись властивостями скалярного добутку векторів запишемо:

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}'_1 = \|\mathbf{v}_1\| \cdot \|\mathbf{v}'_1\| \cos \theta_{11'} = k_1 k_{1'} + l_1 l_{1'} + m_1 m_{1'},$$

звідки шуканий кут

$$\theta_{11'} = \arccos \left(\frac{k_1 k_{1'} + l_1 l_{1'} + m_1 m_{1'}}{\sqrt{k_1^2 + l_1^2 + m_1^2} \cdot \sqrt{k_{1'}^2 + l_{1'}^2 + m_{1'}^2}} \right).$$

Одиничний вектор, навколо якого необхідно обернути вісь \mathbf{v}'_1 на кут $\theta_{11'}$ визначимо через векторний добуток \mathbf{v}_1 та \mathbf{v}'_1 :

$$\mathbf{v}_{11'} = \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}'_1 = a \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ k_1 & l_1 & m_1 \\ k_{1'} & l_{1'} & m_{1'} \end{vmatrix},$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{(l_1 m_{1'} - m_1 l_{1'})^2 + (m_1 k_{1'} - k_1 m_{1'})^2 + (k_1 l_{1'} - l_1 k_{1'})^2}}.$$

Обертання будемо здійснювати за допомогою кватерніону $q_1 = \cos(\theta_{11'}/2) + \mathbf{v}_{11'} \sin(\theta_{11'}/2)$. При цьому вектор \mathbf{v}'_3 при обертанні перейде у вектор $\mathbf{v}'_{3q} = q_1 \mathbf{v}'_3 q_1^{-1}$. Після цього необхідно здійснити ще одне обертання навколо вектора \mathbf{v}_1 для суміщення векторів \mathbf{v}_3 та \mathbf{v}'_{3q} . Кут цього повороту визначається аналогічно процедурі застосованій для обчислення кута $\theta_{11'}$ за допомогою обчислення скалярного добутку $\mathbf{v}_3 \times q_1 \mathbf{v}'_{3q} q_1^{-1}$.

У розглянутому випадку, тобто коли одна хмара точок отримана з іншої шляхом зміщення та повороту, описана послідовність дій має призвести до їх повного суміщення. Деяка незначна розбіжність може бути викликана обчислювальними похибками і в цьому випадку може знадобитись ще одна ітерація для покращення збіжності розв'язку. Так само гарного результату можна очікувати у випадку віртуального базування моделі у заготовці з приблизно рівномірним припуском на оброблення.

Приклад розв'язання тестової задачі віртуального базування

Для перевірки запропонованого алгоритму була розглянута тестова задача віртуального базування деталі типу «серга». Як заготовку для деталі було взято штамповку з припусками на оброблення, призначеними за стандартною методикою. Після імпорту моделей CAD модель заготовки у було зсунуто за двома осями та повернуто (рис. 3). Таким чином імітувалось розташування заготовки в системі координат верстата. Задача полягала в тому, щоб використовуючи запропонований алгоритм розташувати CAD модель деталі усередині заготовки.

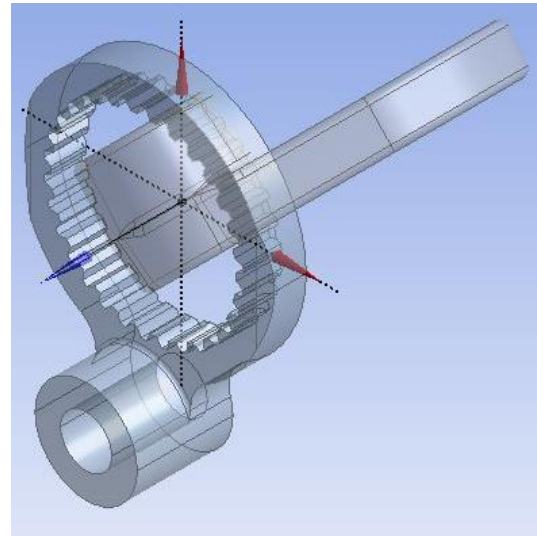


Рис. 3. Початкове розташування CAD моделей заготовки та деталі в тестовій задачі

При проведенні розрахунків враховувалась послідовність оброблення, тобто попереднє розміщення проводилось не для кінцевої деталі, а для заготовки після першого проходу контурного чорнового оброблення з заповненими отворами. Після розрахунку координат центрів ваги у CAD редакторі тонких оболонок, що співпадали з поверхнею первинної заготовки та заготовки після першого проходу контурного чорнового оброблення CAD модель деталі було зсунуто для суміщення розрахованих центрів. Повторний розрахунок координат центрів після виконаного зсуву показав їх розбіжність за однією з координат на величину 0,3 мм. Після контрольного розрахунку розбіжність між центрами складала менш ніж 10^{-6} мм за кожною з координат (рис. 4), що було прийнято як допустимий рівень похибки.

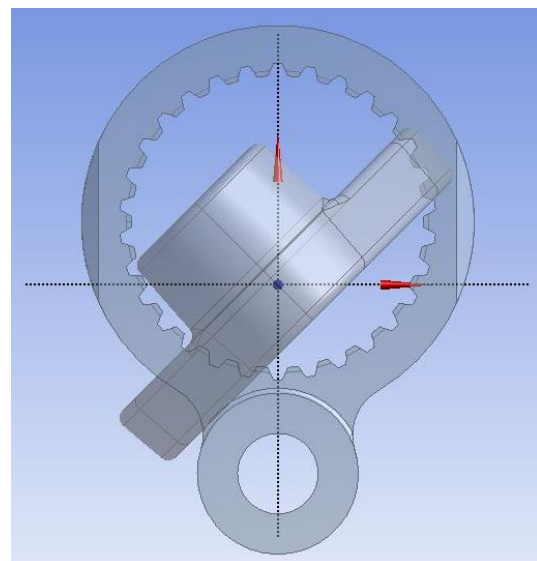


Рис. 4. CAD моделі заготовки та деталі після завершення суміщення центрів

Таким чином було показано, що урахування обчислювальних похибок у визначенні координат центроїдів при використанні запропонованого алгоритму, може потребувати декількох ітерацій у визначенні вектора зсуву CAD моделі деталі. При цьому припустима величина похибки при суміщенні центроїдів сумішуваних оболонок має бути встановлена заздалегідь.

Після цього було розраховано компоненти тензорів інерції оболонок, обчислено направляючі вектори головних центральних осей інерції та здійснено повороти CAD моделі деталі за описаною послідовністю (рис. 5).

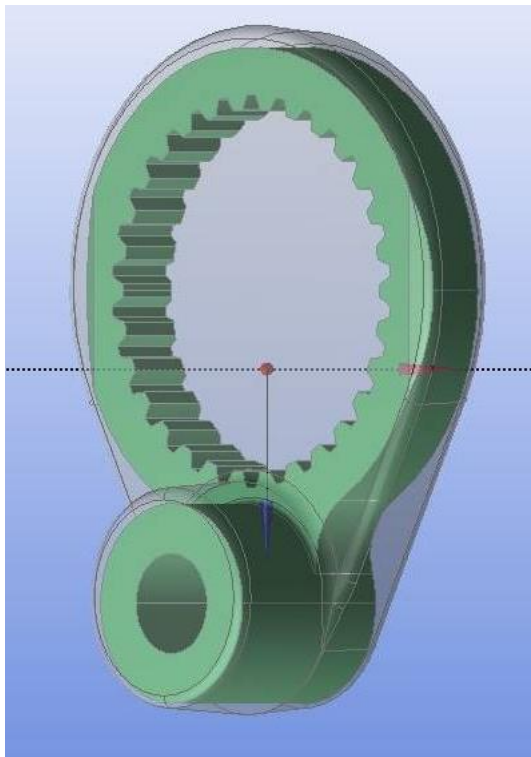


Рис. 5. CAD моделі заготовки та деталі після суміщення головних центральних осей інерції

В результаті CAD модель деталі була повністю занурена всередину заготовки з візуально практично рівномірним припуском. Таким чином, було підтверджено можливість застосування запропонованого алгоритму для визначення стартового розташування при віртуальному базуванні. При цьому у випадку, коли припуск на оброблення є близьким до рівномірного його застосування дозволяє реалізувати віртуальне базування за один етап.

Слід, однак, зазначити, що у випадку нерівномірного припуску, використання цього алгоритму може призвести до часткового виходу CAD моделі деталі за межі заготовки, тому що застосована при його побудові цільова функція має зазначені вище недоліки, притаманні ICP алгоритмам.

Висновки

1. При розв'язанні задачі віртуального базування у якості стартового розташування CAD моделі деталі з формою близькою до форми заготовки можна взяти таке, при якому суміщено центри ваги та головні центральні осі тонких оболонок, які співпадають з поверхнями заготовки та деталі з припуском на чорнове оброблення.

2. При суттєвих розбіжностях форми деталі та заготовки застосування запропонованого алгоритму може призвести до часткового виходу CAD моделі деталі за межі заготовки. У цьому випадку на другому етапі віртуального базування слід застосовувати ітераційну процедуру з використанням цільових функцій чутливих до наявності перетинання таких оболонок.

Література

1. *Alloys for aeronautic applications: state of the art and perspectives [Text]* / A. Gloria, R. Montanari, M. Richetta, A. Varone // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 6. – Article ID: 662. DOI: 10.3390/met9060662.
2. Zhang, X. *Recent advances in the development of aerospace materials [Text]* / X. Zhang, Y. Chen, J. Hu // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2018. – Vol. 97. – P. 22–34. DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.01.001.
3. Balaji, H. *Trends in manufacturing and assembly technologies for next generation combat aircraft [Text]* / H. Balaji, P. Selvaraj, V. S. Rao // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9, no. 5. – P. 667–673.
4. Imad, M. *Optimization methodologies in intelligent machining systems – a review [Text]* / M. Imad, A. Hosseini, H. A. Kishawy // *IFAC-PapersOnLine*. – 2019. – Vol. 52, iss. 10. – P. 282–287. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.043.
5. *Tool path strategy and cutting process monitoring in intelligent machining [Text]* / M. Chen, C. Wang, Q. An, W. Ming // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 13, iss. 2. – P. 232–242. DOI: 10.1007/s11465-018-0469-y.
6. *The review of manufacturing technology for aircraft structural part [Text]* / F. Ma, W. Cao, Y. Luo, Y. Qiu // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 56. – P. 594–598. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.117.
7. Petrakov, Y. *Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine [Text]* / Y. Petrakov, D. Shuplietsov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 98, iss. 2/1. – P. 54–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.
8. *An automated approach for machining allowance evaluation of casting parts [Text]* / Y. Gao, Zh. Du, M. Li, W. Dong // *International Journal of Computer*

Integrated Manufacturing. – 2019. – Vol. 32, iss. 11. – P. 1043–1052. DOI:10.1080/0951192X.2019.1686168.

9. Chatelain, J. F. A balancing technique for optimal blank part machining [Text] / J. F. Chatelain, C. Fortin // *Precision Engineering*. – 2001. – Vol. 25, iss. 1. – P. 13–23. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00050-7.

10. Part localization theory and its application on near-net-shape machining [Text] / Z. Chang, N. Wan, Z. C. Chen et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 101, iss. 9-12. – P. 2663–2679. DOI: 10.1007/s00170-018-3048-9.

11. Besl, P. J. A method for registration of 3-D shapes [Text] / P. J. Besl, N. D. McKay // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1992. – Vol. 14, iss. 2. – P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.

12. Campbell, R. J. A survey of free-form object representation and recognition techniques [Text] / R. J. Campbell, P. J. Flynn // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2001. – Vol. 81, iss. 2. – P. 166–210. DOI: 10.1006/cviu.2000.0889.

13. Ko, K. H. An algorithm for optimal free-form object matching [Text] / K. H. Ko, T. Maekawa, N. M. Patrikalakis // *Computer-Aided Design*. – 2003. – Vol. 35, iss. 10. – P. 913–923. DOI: 10.1016/S0010-4485(02)00205-1.

14. Horn, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [Text] / B. K. P. Horn // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1987. – Vol. 4, iss. 4. – P. 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629.

15. Horn, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices [Text] / B. K. P. Horn, H. M. Hilden, S. Negahdaripour // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1988. – Vol. 5, iss. 7. – P. 1127–1135. DOI: 10.1364/JOSAA.5.001127.

16. Bentley, J. L. Multidimensional binary search trees used for associative searching [Text] / J. L. Bentley // *Communications of the ACM*. – 1975. – Vol. 18, iss. 9. – P. 509–517. DOI: 10.1145/361002.361007.

17. Nuchter, A. Cached k-d tree search for ICP algorithms [Text] / A. Nuchter, K. Lingemann, J. Hertzberg // *3-D Digital Imaging and Modeling : proc. of the 6th Int. conf. (Montreal, Aug. 21–23, 2007)*. – IEEE, 2007. – P. 419–426. DOI: 10.1109/3DIM.2007.15.

18. A non contact CAD based inspection system [Text] / F. Prieto, H. T. Redarce, R. Lepage, P. Boulanger // *Quality Control by Artificial Vision : proc. of the 5th Int. conf. (Trois Rivières, May 19–21, 1999)* / *Canadian Information Processing Society*. – Mississauga, 1999. – P. 133–138.

19. Segal, A. Generalized-ICP [Text] / A. Segal, D. Haehnel, S. Thrun // *Robotics: Science and Systems V : proc. of the conf. (Seattle, June 28–July 1, 2009)* / *University of Washington*. – MIT Press, 2009. – Article ID: 021. DOI: 10.15607/RSS.2009.V.021

20. Servos, J. Multi-channel generalized-ICP: a robust frame-work for multi-channel scan registration [Text] / J. Servos, S. L. Waslander // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2017. – Vol. 87. – P. 247–257. DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.016.

21. Orazi, L. Geometrical inspection of designed and acquired surfaces [Text] / L. Orazi, G. Tani // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – Vol. 34, iss. 1-2. – P. 149–155. DOI: 10.1007/s00170-006-0587-2.

22. A unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surfaces [Text] / Y. W. Sun, J. T. Xu, D. M. Guo, Z. Y. Jia // *Precision Engineering*. – 2009. – Vol. 33, iss. 4. – P. 516–523. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.02.003.

23. Chatelain, J. F. A level-based optimization algorithm for complex part localization [Text] / J. F. Chatelain // *Precision Engineering*. – 2005. – Vol. 29, iss. 2. – P. 197–207. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.07.002.

References

1. Gloria, A., Montanari, R., Richetta, M., Varone, A. Alloys for aeronautic applications: state of the art and perspectives. *Metals*, 2019, vol. 9, iss. 6, article ID: 662. DOI: 10.3390/met9060662.

2. Zhang, X., Chen, Y., Hu, J. Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, vol. 97, pp. 22–34. DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.01.001.

3. Balaji, H., Selvaraj, P., Rao, V. S. Trends in manufacturing and assembly technologies for next generation combat aircraft. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, vol. 9, no. 5, pp. 667–673.

4. Imad, M., Hosseini, A., Kishawy, H. A. Optimization methodologies in intelligent machining systems – a review. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, iss. 10, pp. 282–287. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.043.

5. Chen, M., Wang, C., An, Q., Ming, W. Tool path strategy and cutting process monitoring in intelligent machining. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 232–242. DOI: 10.1007/s11465-018-0469-y.

6. Ma, F., Cao, W., Luo, Y., Qiu, Y. The review of manufacturing technology for aircraft structural part. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 56, pp. 594–598. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.117.

7. Petrakov, Y., Shuplietsov, D. Contour milling programming technology for virtual basing on a CNC machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 98, iss. 2/1, pp. 54–60, DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162673.

8. Gao, Y., Du, Zh., Li, M., Dong, W. An automated approach for machining allowance evaluation of casting parts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 32, iss. 11, pp. 1043–1052. DOI:10.1080/0951192X.2019.1686168.

9. Chatelain, J. F., Fortin, C. A balancing technique for optimal blank part machining. *Precision Engineering*, 2001, vol. 25, iss. 1, pp. 13–23. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00050-7.
10. Chang, Z., Wan, N., Chen, Z. C., Mo, R., Zhang, D. Part localization theory and its application on near-net-shape machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. vol. 101, iss. 9-12, pp. 2663–2679. DOI: 10.1007/s00170-018-3048-9.
11. Besl, P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, vol. 14, iss. 2, pp. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
12. Campbell, R. J., Flynn, P. J. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, vol. 81, iss. 2, pp. 166–210. DOI: 10.1006/cviu.2000.0889.
13. Ko, K. H., Maekawa, T., Patrikalakis, N. M. An algorithm for optimal free-form object matching. *Computer-Aided Design*, 2003, vol. 35, iss. 10, pp. 913–923. DOI: 10.1016/S0010-4485(02)00205-1.
14. Horn, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, vol. 4, iss. 4, pp. 629–642. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000629.
15. Horn, B. K. P., Hilden, H. M., Negahdaripour, S. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, vol. 5, iss. 7, pp. 1127–1135. DOI: 10.1364/JOSAA.5.001127.
16. Bentley, J. L. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 1975, vol. 18, iss. 9, pp. 509–517. DOI: 10.1145/361002.361007.
17. Nuchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J. Cached k-d tree search for ICP algorithms. *Proc. of Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007)*, Montreal, Canada, 2007, pp. 419–426. DOI: 10.1109/3DIM.2007.15.
18. Prieto, F., Redarce, H. T., Lepage, R., Boulanger, P. A non contact CAD based inspection system. *Quality Control by Artificial Vision*, 19–21 May 1999, Trois Rivières, 1999, pp. 133–138.
19. Segal, A., Haehnel, D., Thrun, S. Generalized-ICP. *Robotics: Science and Systems V*, Seattle, WA, USA, 2009, article ID: 021. DOI: 10.15607/RSS.2009.V.021.
20. Servos, J., Waslander, S. L. Multi-channel generalized-ICP: a robust frame-work for multi-channel scan registration. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, vol. 87, pp. 247–257. DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.016.
21. Orazi, L., Tani, G. Geometrical inspection of designed and acquired surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 34, iss. 1-2, pp. 149–155. DOI: 10.1007/s00170-006-0587-2.
22. Sun, Y. W., Xu, J. T., Guo, D. M., Jia, Z. Y. A unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surfaces. *Precision Engineering*, 2009, vol. 33, iss. 4, pp. 516–523. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.02.003.
23. Chatelain, J. F. A level-based optimization algorithm for complex part localization. *Precision Engineering*, 2005, vol. 29, iss. 2, pp. 197–207. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.07.002.

Надійшла до редакції 10.06.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

МЕТОД ВИРТУАЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФОРМОЙ, ПРИБЛИЖЕННОЙ К ФОРМЕ ЗАГОТОВОК

С. И. Планковский, Е. В. Цегельник, В. Б. Минтюк, С. Н. Задорожний, В. В. Комбаров

Предметом изучения в статье являются процессы виртуального базирования деталей при адаптивной механической обработке деталей сложной формы. **Целью** является разработка эффективного метода поиска стартового расположения САД модели детали при виртуальном базировании внутри облака точек, полученных лазерным сканированием заготовки. **Задача:** формализовать процедуру стартового расположения модели детали при как первого этапа процесса виртуального базирования. На втором этапе для окончательного базирования предложено использовать итерационные алгоритмы с целевой функцией, чувствительной к пересечению поверхностей детали и заготовки. При решении задачи стартового расположения использованы инструменты доступные в современных САД пакетах и средствах трехмерного сканирования. Используемыми **методами** являются методы матричной алгебры, в частности методики поиска главных центральных моментов инерции трехмерных объектов на основе тензора инерции. Получены такие **результаты**. При вычислении компонент тензоров инерции предложено использовать данные трехмерного сканирования заготовки и геометрическую информацию детали, полученную из САД системы. В результате получен алгоритм стартового расположения САД модели детали при виртуальном базировании, который в случае заготовок с припуском близким к равномерному может обеспечивать достаточно точное базирование детали для задач адаптивной механообработки. Показано, что для минимизации вычислительных погрешностей и обеспечения удовлетворительной точности базирования предложенный алгоритм может нуждаться в нескольких итерациях поиска вектора сдвига модели. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: в отличие от ранее применяемых подходов, которые при решении задачи виртуального базирования для стартового расположения использовали условие совпадения центров веса тонких оболочек, совпадающих с поверхностями заготовки и детали, предложено дополнительно обеспечить совмещение главных

центральных осей инерции этих оболочек, которые в случае деталей, приближенных к форме заготовок обеспечивает точность базирования, которая может не нуждаться в дополнительных итерационных процедурах.

Ключевые слова: адаптивная механическая обработка; виртуальное базирование; трехмерное сканирование; алгоритмизация в CAD системе.

METHOD OF PARTS VIRTUAL LOCALIZATION FOR NEAR SHAPE BLANKS

S. Plankovsky, Ye. Tsegelnyk, V. Myntiuk, S. Zadorozhniy, V. Kombarov

The **subject matter** of the article is the processes of virtual localization of near shape parts during adaptive machining. The **aim** is to develop an effective method for finding the starting location of a CAD model of a part with virtual localization inside a point cloud obtained by laser scanning of a workpiece. The **task** is to formalize the procedure for starting positioning of the part model as the first stage of the virtual localization process. The second stage for final localization proposed to use iterative algorithms with the objective function which is sensitive to the intersection of the surface parts and the workpiece. In solving the problem the starting position used tools available in today's CAD packages and 3D scanning tools. The **methods** used are the methods of matrix algebra, in particular, the methods for finding the main central moments of inertia of three-dimensional objects based on the tensor of inertia. The following **results** were obtained. When calculating the inertia tensor components is proposed to use three-dimensional scanning data of workpiece and geometrical data of part obtained from the CAD system. The result is an algorithm starting location of CAD model in the virtual localization, which in the case of blanks with oversize close to uniform can provide enough current location parts for adaptive machining tasks. It is shown that to minimize computational errors and to ensure satisfactory accuracy of localization proposed algorithm can require several iterations of the shift vector search model. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: in contrast to the previously used approaches, when solving the problem of virtual localization for the starting position, using the condition of coincidence of the centers of the weight of thin shells coinciding with the surfaces of the workpiece and the part, it was proposed to additionally ensure the alignment of the main central axes of inertia of these shells, which, in the case of near shape blanks, provides a positioning accuracy that may not require additional iterative procedures.

Keywords: adaptive machining; virtual localization; 3D scanning; automation in CAD system.

Планковський Сергій Ігорович – д-р техн. наук, проф., декан факультету літакобудування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Цегельник Євген Володимирович – канд. техн. наук, ст. наук. співр. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Минтук Віталій Борисович – канд. техн. наук, доц. каф. міцності літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Задорожний Сергій Миколайович – генеральний директор, Харківське державне авіаційне виробниче підприємство, Харків, Україна.

Комбаров Володимир Вікторович – ст. викл. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; директор, товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробнича фірма «ХАІ-Інжиніринг», Харків, Україна.

Sergiy Plankovsky – Doctor of Techn. Sci., Professor, Dean of Aircraft Building Faculty, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-2908-903X, Scopus Author ID: 24473286300, ResearcherID: I-5171-2018.

Yevgen Tsegelnyk – PhD, Senior Researcher of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: y.tsegelnyk@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-1261-9890, Scopus Author ID: 57192961558, ResearcherID: J-1570-2015.

Vitalii Myntiuk – PhD, Associate Professor of Aircraft Strength Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: vitalii.myntiuk@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-4047-0192, Scopus Author ID: 57201067344, ResearcherID: Y-6751-2018.

Sergiy Zadorozhniy – Director, Kharkiv state aircraft manufacturing company, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergiy.zadorozhniy63@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-7394-0875.

Volodymyr Kombarov – Senior Lecturer of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»; Director, Research-and-production Company «KhAI-Engineering» LLC, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vl.kombarov@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6158-0374, Scopus Author ID: 57211793853.