

УДК 629.735.33.02-2:621.923.5-047.37

doi: 10.32620/akt.2023.6.08

**В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ, К. В. МАЙОРОВА, С. О. КРАСОВСЬКИЙ,
А. С. СУСЛОВ, Ю. І. ТРУБЧАНІН***Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСУПЕРФІНІШНОГО
ОБРОБЛЕННЯ СФОКУСОВАНИМ СТРУМОМ ВИСОКОТОЧНИХ ДЕТАЛЕЙ
АВІАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Предметом вивчення в статті є електросуперфінішне оброблення сфокусованим струмом високоточних деталей авіаційного виробництва. *Метою* є зменшення шорсткості поверхонь та округлення кромки високоточних деталей типу золотник за короткий час (до 10-11 хвилин) шляхом реалізації принципів суперфінішного оброблення електрохімічних процесів. *Завдання*: поставити експеримент з одночасного оброблення всіх поверхонь, кромки і канавок дослідного зразка деталі типу золотник електросуперфінішним методом сфокусованим струмом. Використовуваними методами є методи емпіричного дослідження – аналіз існуючих і розповсюджених суперфінішних методів оброблення, натурні експерименти та контроль. *Отримані такі результати*. Згідно аналізу встановлено, що найбільше поширення одержала операція електрохімічного формоутворення та суперфінішування для оброблення робочих лопаток турбін і для прошивання отворів різних форм і розмірів. Виявлено, що багата кількість параметрів процесу суперфінішування ускладнює його використання для комплексного оброблення авіаційних деталей. Авторами запропоновано альтернативний метод – електросуперфінішування, суть якої полягає у використанні фокусованого струму, який направлено діє по твірній деталі у електродітчичному розчині. Проведено натурні експерименти з одночасного оброблення всіх поверхонь, кромки і канавки деталі типу золотник електросуперфінішним методом та отримано позитивні результати, а саме: зменшена шорсткість кромки та поверхонь. Встановлено, що шорсткість більш інтенсивно зменшується на першій хвилині оброблення, при цьому більша початкова шорсткість краще зменшується ніж та, що мала початкову невелику шорсткість. *Висновки*. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: набула апробації електросуперфінішне оброблення сфокусованим струмом на зразках високоточних деталей типу золотник; отримано скруглення кромки, покращена шорсткість, видалені задирки. Запропонований метод оброблення може бути корисним при необхідності доводити розміри діаметрів робочих поверхонь з точністю 0,001 мм, що може стати темою наступних досліджень.

Ключові слова: деталь; електросуперфінішне оброблення; авіаційне виробництво; золотник; прецизійна точність; шорсткість.

Вступ

Виготовлення високоточних деталей авіаційного виробництва характеризується використанням новітніх технологій та обладнання, а також вагомою трудомісткістю і необхідністю фахівців високої кваліфікації. Велика кількість робіт реалізується вручну та супроводжується контрольними операціями, що виконують окремі спеціалісти з використанням додаткового обладнання. До високоточних деталей авіаційного виробництва відносяться деталі паливної, гідравлічної та пневматичної систем, систем керування та механізації органів управління. Це корпуси, поршні, штоки, золотники, регулятори, крани, з'єднувальні елементи тощо. Враховуючи значну їх кількість на літальному апараті, стає зрозумілим, що технології їх виготовлення з забезпе-

ченням заданої якості суттєво впливають на загальну вартість виробу. Тому актуальним є необхідність удосконалення технологій оброблення авіаційного виробництва високоточних деталей. Однак останнім часом зростають вимоги до нових виробів [1, 2], а іноді при їх проектуванні розробники стикаються з проблемами, коли необхідна геометрична точність перевищує досяжну або економічну точність [3, 4]. Прагнення досягти і реалізувати задані показники якості супроводжуються в результаті великою кількістю використовуваних процесів та контрольних операцій. Так, при виробництві золотників технологічний процес включає кілька сотень операцій, значна частина з яких виконується вручну працівниками високої кваліфікації. Скорочений маршрутний процес виготовлення простого золотника складається з такої послідовності виготовлення: відрізка,

токарне оброблення, безцентрове шліфування, плоске шліфування, свердління, слюсарне оброблення, промивка, контроль, загартовування, контроль, промивка, оброблення холодом, отпуск, магнітно-пошкочувальний контроль, термоудар, круглошліфувальне оброблення, отпуск, розмагнічування, магнітно-пошкочувальний контроль, промивка ультразвуком, хімічне пасерування, контроль, консервування. Особливістю є використання процесів механічного оброблення разом з процесами термічної, електрофізичної та електролітичної дії. При цьому необхідна точність елементів виробу досягається поступово при обробленні окремих елементів деталі, що чергується контрольними операціями. Загальна точність виробів відноситься до вищого ступеня точності деталей машинобудування. В таблиці 1 наведені відхилення основних показників геометричної точності елементів деталі типу золотник.

Таблиця 1
Допуск основних показників геометричної точності елементів деталі типу золотник

Елемент деталі	Величина допуску, мм
Кромки:	
зовнішні	0,1...0,4
внутрішні	0,2...0,4
робочі поверхні	-0,1
Биття поверхонь	0,02
Овальність і конусність	0,002
Робочі поверхні відносно центру	биття 0,002
Поверхні канавок відносно робочої поверхні	биття 0,05
Зазор золотникової пари	0,002...0,004

Аналізуючи дані таблиці 1, допуск овальності, конусності та биття робочих поверхонь відносно центрів складає 0,002 мм. Для досягнення такої точності виробництво має бути оснащено прецизійними верстатами і з використанням багатьох технологій: механічної та різних видів термічного оброблення, а також хімічних або електрохімічних процесів та контролю якості [5].

Особливої уваги заслуговують останні електрохімічні процеси, що виконуються на передостанніх етапах виготовлення високоточних деталей типу золотник і стають на заміну ручного та шліфувального оброблень. Це дозволить зменшити трудомісткість виготовлення, підвищити точність виконання розмірів, зменшити кількість контрольних операцій в порівнянні з ручним механічним обробленням, що неодмінно вплине на собівартість продукції.

Метою досліджень є зменшення шорсткості поверхонь та округлення кромки високоточних деталей типу золотник за короткий час (до 10-11 хви-

лин) шляхом реалізації принципів суперфінішного оброблення електрохімічних процесів.

Завданням досліджень було одночасне оброблення всіх поверхонь, кромки і канавки зразка високоточної деталі типу золотник електросуперфінішним методом сфокусованим струмом.

1. Аналіз літературних джерел та стан питання

Задачу комплексного оброблення високоточних деталей вирішують в роботі [6], в якій досліджено зменшення показників шорсткості Ra на зовнішній поверхні циліндричних заготовок, виготовлених з немагнітних матеріалів, і розглядається новий метод, заснований на ефекті магніточутливої (магнітокерованої) розумної рідини. Зразки в цьому дослідженні виготовлені з алюмінію як відомий і розповсюджений в конструкціях літальних апаратів різновид немагнітних, м'яких і легких матеріалів. Апарат, який використовувався для цього експерименту, включає два основних рухи. Перший – це використання прямолінійного змінного руху для покращення умов оброблення, а другий – обертальний рух зразка. Незважаючи на позитивні результати, отримані в роботі [6] проблемним є оброблення таким методом деталей з магнітних матеріалів.

Технологія для оброблення високоточних деталей авіаційного виробництва електрохімічним обробленням (ЕХО) є більш поширена [7]. Особливими перевагами ЕХО перед іншими схожими електричними методами є простота додавання великих сил струму, що забезпечують високу продуктивність, майже повну відсутність зносу інструмента, порівняно високий клас чистоти обробленої поверхні. Для виконання ЕХО виготовляють спеціальні пристосування, у які входять електроди інструменти, що копіюють форму розташування гострих крайок на деталі. При цьому деталь є анодом, електрод – катодом, а в зазор між електродом і гострими крайками подається електроліт – водний розчин хлористого натрію NaCl, бромистого калію KBr тощо. Недоліком ЕХО за такими схемами є складність забезпечення стабільності процесу оброблення, що в свою чергу впливає на точність. Однак, незважаючи на цей недолік, ЕХО застосовують для видалення задирів і округлення гострих кромки на зубах шестерень, шліцевих валиках, у важкодоступних місцях деталей паливної апаратури, прошивання отворів та ін. [8].

Найбільше поширення одержала операція електрохімічного формоутворення для оброблення профілю пера робочих лопаток парових і газових турбін, в основному з важкооброблюваних сплавів [9]. Профіль пера обробляється одночасно з двох сторін лопатки двома електродами-інструментами зі сталі

X18H9T, що мають форму лопатки. У зазор між електродами й оброблюваними поверхнями лопатки під тиском 5...6 МПа прокачується електроліт щільністю 1,10...1,20. Однак отримана точність оброблення в цьому випадку досить не велика і складає 0,2...0,4 мм.

ЕХО метод використовують для прошивання отворів різних форм, прорізів і вікон порожніми електродами, як правило, із внутрішнім підведенням електроліту, що виводиться через бічний міжелектродний зазор [10]. Точність таких операцій також є невисокою при низькій якості поверхонь отвору.

ЕХО на сьогодні є практично єдиним методом прошивання глибоких отворів малого діаметра, наприклад, охолоджуваних каналів у важкооброблюваних жароміцних матеріалах робочих лопаток газових турбін [11, 12]. Отвір діаметром 0,4...1,6 мм прошивають на глибину до 300 мм на спеціальній установці. Як електрод-інструмент використовують тонкостінні трубки зі сталі 1X18H9T з ізоляційним покриттям полімерними емаліями. Процес прошивання здійснюється при обертанні електрода (8...15 об/хв) з метою усунення його відведення. Електроліт подається в електрод під тиском 20...100 МПа, напруга на електродах 18...22 В, щільність струму 6 А/мм². Подача електрода складає 1,5...12 мм/хв. Вимоги щодо точності форми отворів залежить від точності оброблення торця електрода й досягає $\pm 0,025$ мм [13].

Мікроелектроерозійне оброблення (МЕЕО) відіграє значну роль у світі мініатюризації, особливо в мікроелектромеханічних системах, біомедичних пристроях, мікроштампах тощо. Мікроелектроерозійне фрезерування є варіантом МЕЕО, що використовується для створення складних 3D-об'єктів за допомогою інструменту простої форми. Механізм видалення матеріалу МЕЕО залежить від електротеплової енергії між електродом інструменту та деталлю. МЕЕО як процес безконтактного оброблення, призводить до створення мініатюрних елементів у важкооброблюваних матеріалах [14]. Точність такого оброблення теж не є високою.

Для підвищення точності деталі та зменшення шорсткості її поверхонь використовується суперфінішування. Суперфінішування або мікрохонінгування, як його називають деякі автори – процес шліфування, який використовується для зовнішнього очищення поверхні деталей циліндричної, плоскої та сферичної форми. Це не процес зміни розмірів, але в основному використовується для виготовлення готових поверхонь найвищої якості. Видаляється лише незначна кількість матеріалу (2-30 мкм), що представляє шорсткість поверхні. Процес хонінгування включає два основних рухи, тоді як суперфініш вимагає трьох і більше рухів. В результаті цих

рухів шлях абразиву є випадковим і ніколи не повторюється [15]. Слід відзначити, що суперфінішування впливає тільки на мікрогеометрію деталі. Бруски зернистістю притискаються до оброблюваної поверхні зі слабким зусиллям 1...3 МПа. Швидкість обертання заготовки $v = 0,05...3,0$ м/с, коливання інструмента 2...6 мм, число подвійних ходів 200...1000 у хвилину. Переміщення інструмента уздовж поверхні здійснюють зі швидкістю, що виключає проходження абразиву по тому самому місці двічі. Як змащення використовують газ із маслом. Припуск складає 0,005...0,007 мм, який призначають в полі допуску шліфування. Суперфінішування дозволяє одержати шорсткість Ra, що становить 0,16 мкм. При досягненні визначених показників опорної поверхні масло-газова плівка перестає руйнуватися на мікроплощах шорсткостей і знімання металу припиняється. Процес різання автоматично припиняється в міру збільшення площі опорної поверхні в результаті стирання мікронерівностей поверхні, що піддається суперфінішуванню. Так, в роботі [16] доведено, що поверхнева шорсткість зменшується за перші 10 с на 57,9%, другі – 17,6%, треті – 12,9%, четверті – 2,3%.

Скріплений абразивний камінь, робоча поверхня якого відповідає формі поверхні деталі, піддається дуже легкому тиску. Короткий високочастотний хід, накладений на зворотно-поступальну траверсу, використовується для оброблення великих відрізків. Розмір зернистості вибирається для різних матеріалів з широкого діапазону (60-1000), щоб відповідати ситуації оброблення, що варіюється від грубого оброблення до тонкої або надзвичайно тонкого оброблення. Ширина каменю становить від 60% до 80% діаметра деталі, але не більше 25 мм. Для деталей діаметром понад 150 мм влаштовують кілька камінців. Ця довжина дещо менша за робочу довжину, але не більше ніж у три рази перевищує ширину каменю. Для оброблення довгих деталей реалізують додаткове переміщення траверси. Зазвичай для отримання точних виробів призначають швидкість в межах 30-60 м/хв, але для чистового оброблення використовують вищу швидкість – 120 м/хв. При більш низьких швидкостях роботи в процесі суперфінішування зазвичай утворюється виразний заштрихований візерунок, який може бути бажаним у багатьох застосуваннях, незважаючи на низьку відбивну здатність поверхні.

При суперфінішуванні завжди обертається деталь тоді, як у хонінгуванні – інструмент [17]. Швидкий зворотно-поступальний рух брусків за короткий хід – основна характеристика, що відрізняє суперфінішне оброблення від хонінгування. У деяких машинах використовується довжина одиночного ходу 4,76 мм, тоді як інші забезпечують змінну дов-

жину ходу в діапазоні приблизно 2-5 мм. Фактична лінійна швидкість коливань є функцією довжини ходу (амплітуда) та швидкості зворотно-поступального руху (частота). Типові крайні швидкості поворотно-поступального руху становлять 3-20 м/хв.

Багата кількість параметрів процесу суперфінішування ускладнює його використання для комплексного оброблення деталей, тому цей метод знайшов своє поширення в основному для покращення якості тільки робочих поверхонь деталей з високою точністю.

Таке різноманіття операцій і технологій ускладнює виробництво та збільшує вартість виробу, де в результаті оброблення кромки, канавки та операції пасивування та очищення виконуються з використанням інших процесів. Альтернативою є дослідження, представлені в [18], авторів даної статті, де запропоновано єдину комплексну конвергентну технологію отримання високоточних деталей авіаційного виробництва, яка поєднує кілька одиничних технологій. Однією з них є електросуперфінішування, суть якої полягає у використанні фокусованого електрода, який направлено діє по твірній деталі, що обертається з великою швидкістю навколо своєї осі у електролітичному розчині. Велике значення при цьому приділяється сумісному обробленню як робочих поверхонь деталі, так і досягнення необхідної

геометричної точності її поверхонь, а також необхідного стану кромки, які мають дуже важливу роль у функціонуванні деталей, наприклад, золотникових пар. Позитивні результати такої операції представлені у роботі авторів [19] на простій циліндричній формі деталі. Експеримент дозволив установити, що є:

- можливість збільшення щільності струму за рахунок зменшення ширини катодного зазору;
- використання джерела постійного струму замість імпульсного, досягаючи при цьому ефект полірування;
- легке видалення продуктів окислення, зберігаючи чистоту поверхні деталей;
- інтенсивне перемішування розчину та формування стабільного розміру оксидної плівки.

Тому є актуальним продовжити дослідження за електросуперфінішем сфокусованим струмом, представленого в роботах [18, 19] на деталях з канавками з метою імітації оброблення золотників.

2. Експериментальні дослідження та аналіз результатів

Дослідження проводилось на макетах золотника діаметром 8 мм з нержавіючої сталі, креслення якого представлено на рис. 1. На кромках золотника

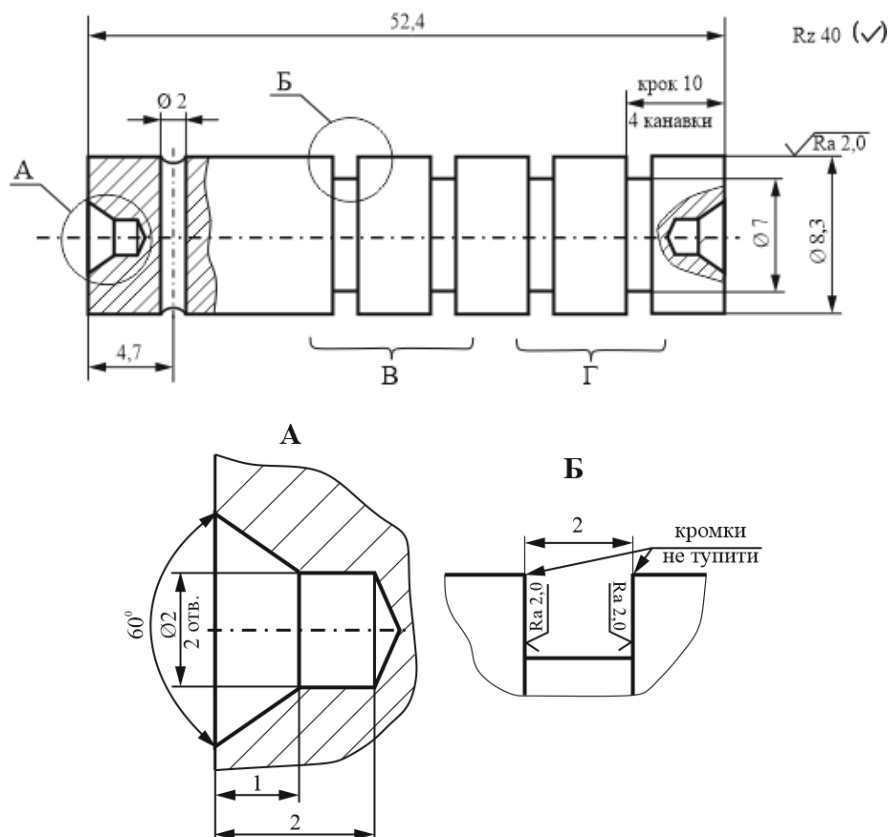


Рис. 1. Геометричні дані зразка типу золотник

при формуванні канавок штучно було створено мікрозадирки різного характеру, які найчастіше трапляються при виробництві подібних деталей. Досліджувалась шорсткість робочих поверхонь після оброблення на кожному інтервалі, округлення кромки робочих поверхонь золотника до і після оброблення, а також видалення задирок на робочих поверхнях золотника.

Експериментальні дослідження проводили на установці для електрохімічного оброблення деталей невеликих габаритів у стаціонарному електроліті моделі ЕЗІ-2М. Оброблення зразка у ванні методом електросуперфінішу проводилась з інтервалами часу від 1 до 11 хвилин з частотою 500 обертів деталі на хвилину при температурі розчину 30°C та величині струму 1 А. Фото оброблення зразка у ванні методом електросуперфініша надано на рис. 2.

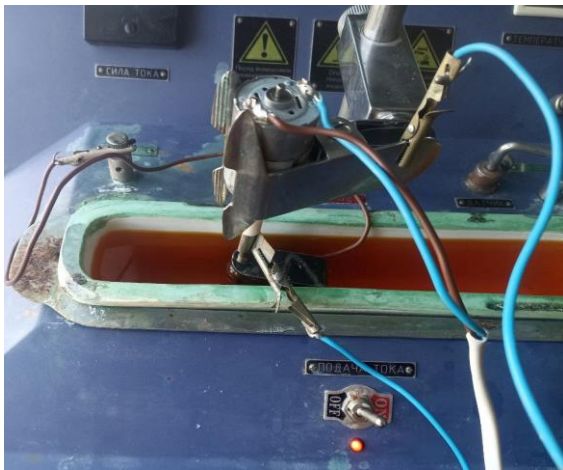


Рис. 2. Оброблення зразка у ванні електросуперфінішем сфокусованим током

Розчин електроліту об'ємом 1 л складався з ортофосфорної кислоти 650 мл, сірчаної кислоти 150 мл, хромового оксиду 60 г та води 140 мл. Концентрація кислоти становила 44 %.

Зовнішній вигляд зразків до і після оброблення представлено на рисунку 3. Після оброблення деякі зони мають матову поверхню, що є окисною плівкою, утвореною в електроліті (рис. 3, б).

На рисунку 4 надано графік зміни шорсткості робочих поверхонь зразка після кожного етапу оброблення за часом, що мали різну початкову шорсткість: 1 – $Ra=0,58$; 2 – $Ra=0,53$; 3 – $Ra=0,9$.

Заміри шорсткості виконувалися за допомогою прибору TMR-120.

Проведені досліди дозволили встановити, що шорсткість більш інтенсивно зменшується на першій хвилині оброблення, при цьому більша початкова шорсткість Ra 0,9 краще зменшується ніж та, що мала початкову невелику шорсткість Ra 0,6.

Не зважаючи на відмінність показників один від одного, в цілому для всіх поверхонь спостеріга-

ється однакова тенденція зменшення шорсткості, яка становить в середньому 0,2...0,25 мкм за 10-11 хвилин.

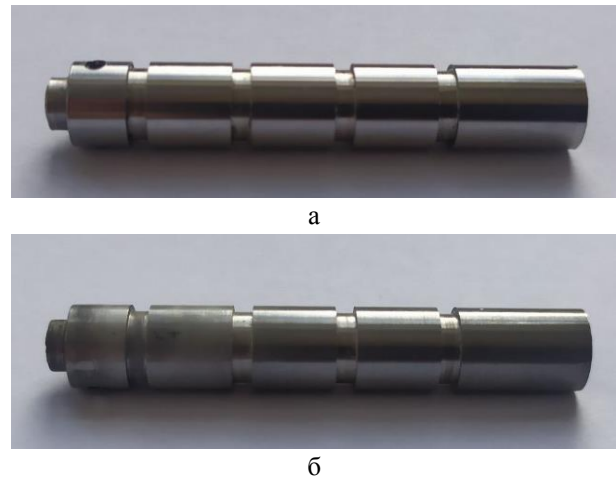


Рис. 3. Золотник: а – до оброблення; б – після оброблення

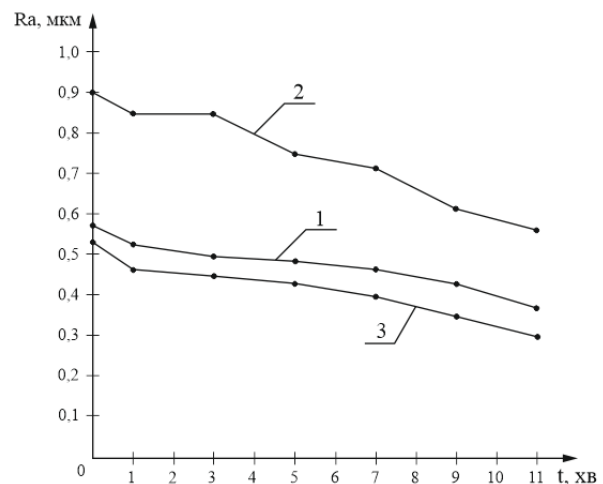


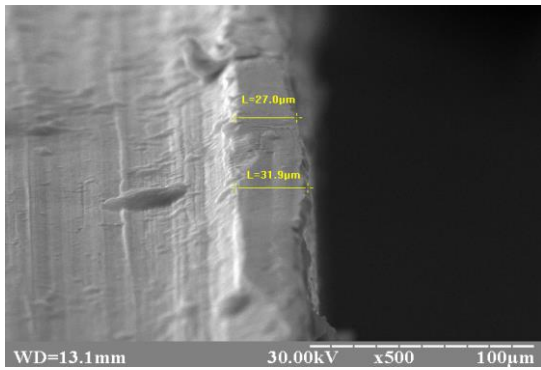
Рис. 4. Графік зміни шорсткості при електросуперфінішуванні поверхонь: 1, 2, 3 – поверхні з різною початковою шорсткістю

Дослідження проводилось також щодо якості поверхонь деталі та кромки, які утворювались на межах перетину робочих поверхонь золотника і поверхонь канавок, які утворювались при механічному обробленні цих поверхонь. Було використано наступне обладнання:

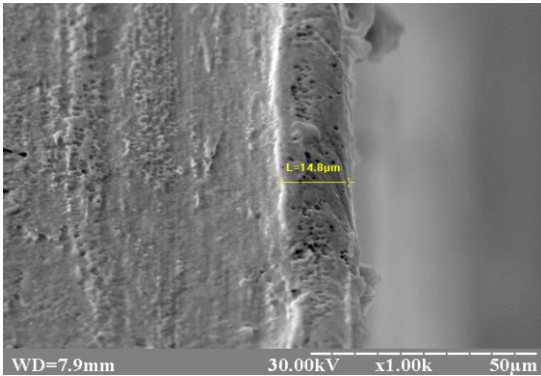
- мікроскоп електронний растровий з камерою низького вакууму і системою енергодисперсійного мікроаналізу ПЕМ-106;

- мікроскоп електронний просвічувальний з міні-лінзами ПЕМ 100-01.

Фото кромки та поверхонь до та після електро-суперфінішного оброблення наведено на рис. 5 – 9.

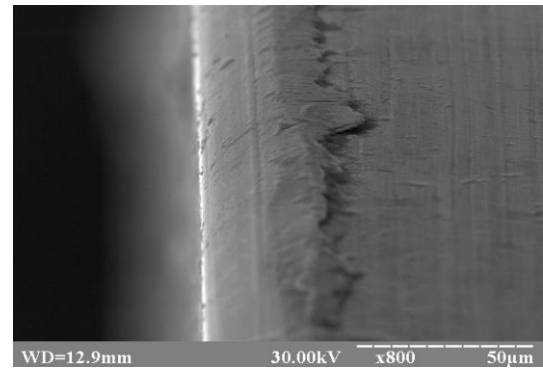


а

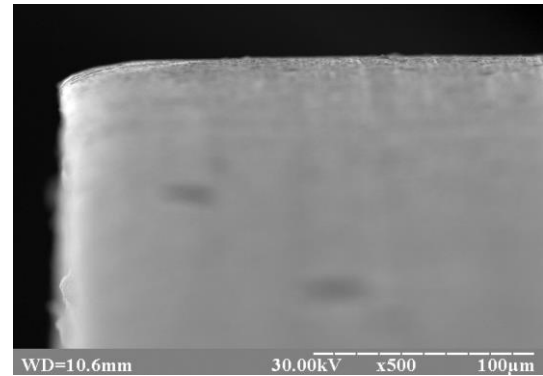


б

Рис. 5 Кромка біля канавки:
а – до суперфінішного оброблення;
б – після оброблення

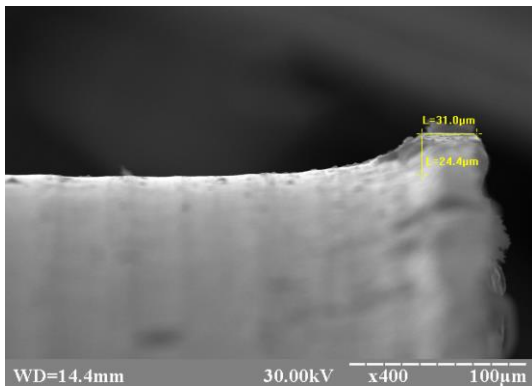


а

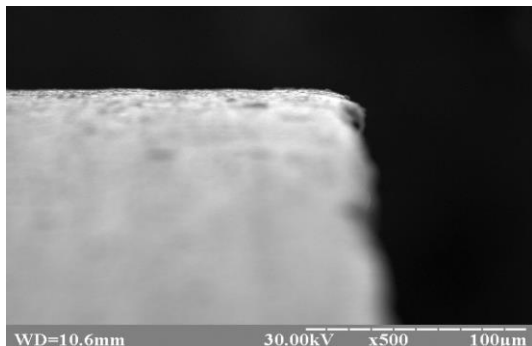


б

Рис. 7. Фото дослідних кромок та поверхні біля канавки: а – до оброблення; б – після оброблення

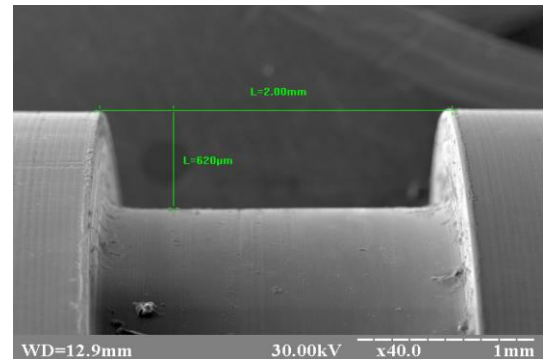


а

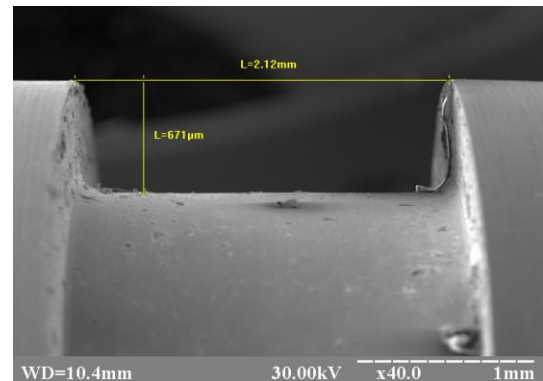


б

Рис. 6. Кромка біля канавки:
а – до оброблення; б – після оброблення



а



б

Рис. 8. Фото дослідних канавок:
а – до оброблення; б – після оброблення

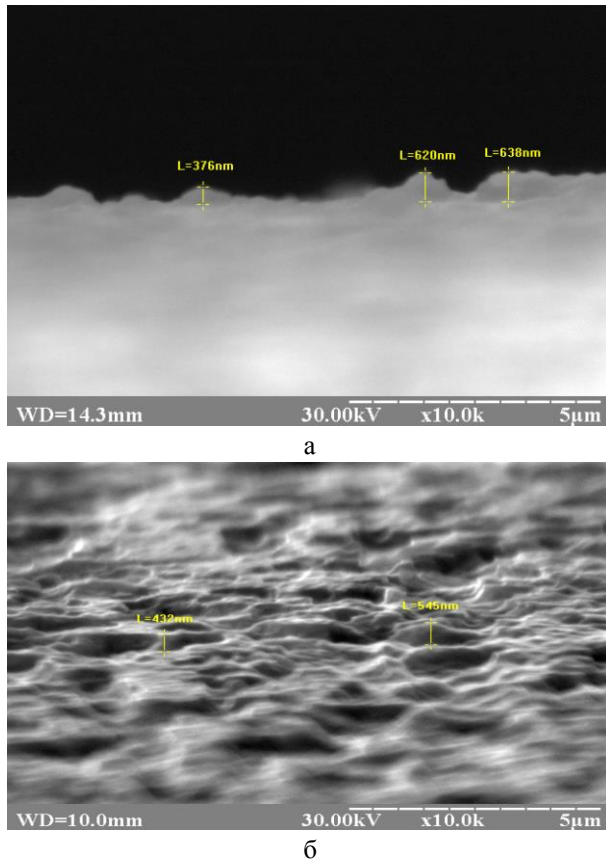


Рис. 9. Фото рельєфу робочої поверхні зразка золотника: а – до оброблення; б – після оброблення

Аналіз отриманих результатів (рис. 5 – 9) дозволив установити ефективні зміни в якості всіх поверхонь, канавок та кромки, які утворювались на межах перетину робочих поверхонь дослідного зразка типу золотник. На рисунку 5 видно характерний здвиг кромки, утворений при формуванні канавки і її зменшення після електросуперфінішного оброблення майже в 2 рази. Більш наглядно можна відслідкувати це за рисунком 6, де показана та сама кромка збоку. З рисунку 7 досить ясно видно утворення задирок вдовж кромки після механічного оброблення і їх розчинення. Цей факт підтверджується і на канавках рисунку 8. Видно, що на першому фото по кромках канавки присутні задирки, які зникли після оброблення. Цей факт доводить закруглення гострих кутів кромки, що є результатом концентрації щільності току у місцях загострення форми або її локалізації. Фото на рис. 9 демонструє, що максимальна нерівність робочої поверхні коливається в межах 376...638 нм до оброблення та 432...545 нм після оброблення. Ці дані добре погоджуються з даними таблиці 1.

Таким чином запропонований процес сумісного оброблення робочих поверхонь високоточних деталей типу золотник, які мають дуже важливу роль у функціонуванні паливної, гідравлічної та

пневматичної систем, систем керування та механізації органів управління систем літальних апаратів, дозволяє за одну технологічну операцію досягти необхідних геометричної точності і стану кромки. Показники шорсткості та геометрія регулюються часом оброблення (рис. 4), де ефективність процесу реалізується на перших хвилинах оброблення при одночасному поліпшенні шорсткості робочих поверхонь, закругленні кромки та ліквідації мікрозадирок після механічного оброблення.

Подальші дослідження мають бути на зношених високоточних деталях з контролем геометрії, шорсткості, структури матеріалу тощо. Отримані дані можуть послужити основою для створення рекомендацій щодо створення технології відновлювального ремонту таких деталей.

Висновки

Отримані результати експериментів підтвердили позитивність досліджень робіт [18, 19], що набули продовження на зразках високоточних деталей типу золотник. Так завдяки використанню нового електросуперфінішного оброблення сфокусованим струмом можна скоротити операції на видалення задирок, досягти скруглення кромки, покращити шорсткість, а також в певних зонах доводити розміри діаметрів робочих поверхонь з точністю 0,001 мм.

Внесок авторів: формулювання завдань дослідження – **В. Т. Сікульський**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **К. В. Майорова, Ю. І. Трубчанин**; виконання експерименту – **С. О. Красовський**; контроль зразків – **А. С. Сулов**; аналіз отриманих результатів та формулювання висновків – **В. Т. Сікульський, К. В. Майорова**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. ASME B46.1-2019. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)* [Text]. – N. Y. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2019. – 145 p.
2. ДСТУ ГОСТ 2.052:2006. *Єдина система конструкторської документації. Електронна модель виробу. Загальні положення з поправкою (ГОСТ 2.052-2006, IDT)* [Текст]. – Введ. 2007-07-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2006. – 17 с.
3. Wang, Q. J. *Encyclopedia of Tribology* [Text] / Q. Jane Wang, & Yip-Wah Chung. – NY, Springer, 2013. – 4139 p. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5.
4. Gwidon, W. S. *Engineering tribology* [Text] / W. Stachowiak Gwidon, & W. Batchelor Andrew. – GB,

Butterworth-Heinemann, 2014. – 744 p. DOI: 10.1016/C2011-0-07515-4.

5. Gupta, K. *Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review*. [Text] / K. Gupta, & M. K. Gupta // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019. – Vol. 233, Iss. 12. – P. 4213-4232. DOI: 10.1177/0954406218811982.

6. *Experimental studies on the ultra-precision finishing of cylindrical surfaces using magnetorheological finishing process* [Text] / R. Gheisari, A. A. Ghasemi, M. Jafarkarimi, & S. Mohtaram // *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*, 2014. – Vol. 2, No. 1. – P. 550-557. DOI: 10.1080/21693277.2014.945265.

7. Ruszaj, A. *Electrochemical machining – special equipment and applications in aircraft industry* [Text] / A. Ruszaj, J. Gawlik, S. Skoczypie // *Management and Production Engineering Review*. – 2016. – Vol. 7, No. 2. – P. 34-41. DOI: 10.1515/mper-2016-0015.

8. Rao, P. S. *Electro Chemical Honing (ECH) of External Cylindrical Surfaces of Titanium Alloys* [Text] / P. Sudhakar Rao, P. K. Jain, & D. K. Dwivedi // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 936-945. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.452.

9. Liu, C. *Jet engine blade: Design, materials, and manufacturing* [Text] / Chenghao Liu // *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Innovation and Applied Physics. Ser. Theoretical and Natural Science*. – 2023. – Vol. 14. – P. 42-46. DOI: 10.54254/2753-8818/14/20240876.

10. Yang, Y. *Research on Preparation Method and Mechanism of Cylinder Ultra-fine Crystal Metal Spinning* [Text] / Y. Yang, & Y. Jia // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 563, Iss. 2. – Article No. 022019. DOI: 10.1088/1757-899X/563/2/022019.

11. Неманежін, С. О. *Теоретичні та експериментальні методи визначення характеристик міцності лопаток турбін при термомеханічному навантаженні* [Текст] / С. О. Неманежін, В. М. Івко, & Ю. І. Торба // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4 спецвипуск 1 (173). – С. 93-101. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup1.13.

12. Wu, R. *Shaping Law and Motion Design in NC-ECM under Effect of Twiste Angle* [Text] / Rui Wu, Dan Wen Zhang, & Juan Sun // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vols. 128-129. – P. 1010-1014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.128-129.1010.

13. Wüthrich, R. *Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon – an overview* [Text] / R. Wüthrich, & V. Fascio // *International Journal of Machine Tools and*

Manufacture. – 2005. – Vol. 45, Iss. 9. – P. 1095-1108. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.011.

14. Kar, S. *Electrode wear phenomenon and its compensation in micro electrical discharge milling: a review* [Text] / S. Kar, & P. K. Patowari // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 33, Iss. 14. – P. 1491-1517. DOI: 10.1080/10426914.2018.1453144.

15. Micallef, C. *Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings* [Text] / C. Micallef, Y. Zhuk, & A. I. Aria // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, No. 8. – Article no. 731. DOI: 10.3390/coatings10080731.

16. *Superfinishing (Microhoning). Traditional Machining Technology* [Electronic resource]. – Access mode: https://ebrary.net/200106/engineering/superfinishing_microhoning. – 08.10.2023.

17. Holzknacht, E. *Isotropic superfinishing: A high-powered solution for complex parts finishing* [Text] / E. Holzknacht, & Rösler // *Metal Finishing*. – 2008. – Vol. 106, Iss. 5. – P. 36-38. DOI: 10.1016/S0026-0576(08)80124-9.

18. *Convergence technology of vehicle parts surface finishing* [Text] / V. Sikulskiy, K. Maiorova, Iu. Vorobiov, P. Fomichev, & S. Myronova // *XIV International Scientific Conference “Transport problems 2022”*, Katowice – Silesia, 29 June – 1 July 2022. – Katowice, 2022. – P. 637-646.

19. *Experimental research of electrofinishing processing of high precision parts as a composition of convergence technology* [Text] / V. Sikulskiy, K. Maiorova, S. Krasovskiy, O. Rebrin, & V. Agarkov // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023*. – Kharkiv, Ukraine : National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” (In Print).

References

1. ASME B46.1-2019. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. N. Y., American Society of Mechanical Engineers (ASME) Publ., 2019. 145 p.

2. DSTU 2.052:2006 *Yedyna systema konstruktors'koyi dokumentatsiyi. Elektronna model' vyrobu. Zahal'ni polozhennya* (HOST 2.052-2006, IDT). Kyiv, DP «UkrNDNCz» Publ., 2016. 17 p.

3. Wang, Q. J., & Chung, Y.-W. *Encyclopedia of Tribology*. NY, Springer Publ., 2013. 4139 p. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5.

4. Gwidon, W. S., & Andrew, W. B. *Engineering tribology*. GB, Butterworth-Heinemann Publ., 2014. 744 p. DOI: 10.1016/C2011-0-07515-4.

5. Gupta, K., & Gupta, M. K. *Developments in nonconventional machining for sustainable production:*

A state-of-the-art review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, vol. 233, iss. 12, pp. 4213-4232. DOI: 10.1177/0954406218811982.

6. Gheisari, R., Ghasemi, A. A., Jafarkarimi, M., & Mohtaram, S. Experimental studies on the ultra-precision finishing of cylindrical surfaces using magnetorheological finishing process. *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 550-557. DOI: 10.1080/21693277.2014.945265.

7. Ruszaj, A., Gawlik, J., & Skoczypiec, S. Electrochemical machining – special equipment and applications in aircraft industry. *Management and Production Engineering Review*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 34-41. DOI: 10.1515/mper-2016-0015.

8. Rao, P. S., Jain, P. K., & Dwivedi, D. K. Electro Chemical Honing (ECH) of External Cylindrical Surfaces of Titanium Alloys. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 936-945. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.452.

9. Liu, C. Jet engine blade: Design, materials, and manufacturing. *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Innovation and Applied Physics. Ser. Theoretical and Natural Science*, 2023, vol. 14, pp. 42-46. DOI: 10.54254/2753-8818/14/20240876.

10. Yang, Y., & Jia, Y. Research on Preparation Method and Mechanism of Cylinder Ultra-fine Crystal Metal Spinning. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 563, iss. 2, article no. 022019. DOI: 10.1088/1757-899X/563/2/022019.

11. Nemanzhyn, Ye. O., Ivko, V. M., & Torba, Yu. I. Teoretychni ta eksperymental'ni metody vyznachennya kharakterystyk mitsnosti lopatok turbin pry termo-mekhanichnomu navantazhenni [Theoretical and experimental methods for determining the strength characteristics of turbine blades under thermomechanical loading]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4sup1 (173), pp. 93-101. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.13. (In Ukrainian).

12. Wu, R., Zhang, D. W., & Sun, J. Shaping Law and Motion Design in NC-ECM under Effect of Twiste Angle. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vols. 128-129, pp. 1010-1014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.128-129.1010.

13. Wüthrich, R., & Fascio, V. Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon – an overview. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, iss. 9, pp. 1095-1108. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.011.

14. Kar, S., & Patowari, P. K. Electrode wear phenomenon and its compensation in micro electrical discharge milling: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33, iss. 14, pp. 1491-1517. DOI: 10.1080/10426914.2018.1453144.

15. Micallef, C., Zhuk, Y., & Aria, A. I. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 8, article no. 731. DOI: 10.3390/coatings10080731.

16. *Superfinishing (Microhoning). Traditional Machining Technology*. Available at: https://ebrary.net/200106/engineering/superfinishing_microhoning (accessed 08 October 2023).

17. Holzknicht, E., & Rösler. Isotropic superfinishing: A high-powered solution for complex parts finishing. *Metal Finishing*, 2008, vol. 106, iss. 5, pp. 36-38. DOI: 10.1016/S0026-0576(08)80124-9.

18. Sikulskiy, V., Maiorova, K., Vorobiov, Iu., Fomichev, P., & Myronova, S. Convergence technology of vehicle parts surface finishing. *XIV International Scientific Conference "Transport problems 2022", Katowice – Silesia, 29 June – 1 July 2022*, Katowice, 2022, pp. 637-646.

19. Sikulskiy, V., Maiorova, K., Krasovskiy, S., Rebrin, O., & Agarkov, V. Experimental research of electrofinishing processing of high precision parts as a composition of convergence technology. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023*. Kharkiv, Ukraine, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" (In Print).

Надійшла до редакції 10.09.2023, розглянута на редколегії 20.11.2023

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTROSUPERFINISHING FOCUSED CURRENT HIGH PRECISION PARTS AVIATION MANUFACTURING

*Valeriy Sikulskiy, Kateryna Maiorova, Serhii Krasovskiy,
Artem Suslov, Iurii Trubchanin*

The object of this study is the electrochemical superfinishing of high-precision aerospace assembly components (aircraft parts) by focusing on the current. The goal is to reduce the surface and edge roughness of high-precision parts of the spool valve type in a short time (up to 10-11 minutes) by implementing the principles of

superfinishing along with electrochemical processes. The task: to conduct an experiment on the simultaneous processing of all the surfaces, edges, and grooves of a test sample of a high-precision part of a spool valve type by the electrochemical superfinishing method with a focused current. Methods of research include empirical analysis of existing and widespread methods of superfinishing, full-scale experiments, and inspection. The following results were obtained. According to the analysis, it was found that there are two the most widespread operations: electrochemical processing with subsequent superfinishing of the turbine working blades and processing of holes of various shapes and sizes. It was also found that the large number of superfinishing process parameters complicates its use for complex processing of aerospace assembly components. The authors proposed an alternative method – electrochemical superfinishing, the peculiarity of which is the use of a focused current that acts directly along the part generatrix, while the part rotates at high speed around its longitudinal axis in an electrolyte. Full-scale experiments were carried out on the simultaneous processing of all surfaces, edges, and grooves of a high-precision part sample of the spool valve type by electrochemical superfinishing, and positive results were obtained: part surfaces and edges roughness was reduced. It was found that the roughness decreases more intensively during the first minute of processing, and a higher initial roughness reduces better than an initially smaller roughness. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows: electrochemical superfinishing with a focused current has been approved on the samples of high-precision aerospace components of the spool valve type; rounding of edges, improved roughness, and removal of burrs were obtained. The proposed method of processing use is rational when there is a need for accuracy of the working surface diameters of 0.001 mm, and it can be the subject of further research.

Keywords: part; electrochemical superfinishing; aerospace manufacturing; spool valve; precision accuracy; surface roughness.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Красовський Сергій Олександрович – зав. лаб. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Суслов Артем Сергійович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Трубчанін Юрій Ігорович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Valeriy Sikulskiy – Doctor of Technical Science, Full Professor, Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vsikulskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5944-4728.

Kateryna Maiorova – PhD, Associate Professor, Head of the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kate.majorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791.

Serhii Krasovskyi – PhD Student at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: krasovsky8991@ukr.net.

Artem Suslov – PhD Student at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.suslov@koda.ua, ORCID: 0009-0002-1831-1862.

Iurii Trubchanin – PhD Student at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: trubchanin93@gmail.com.