

**Юрій ТРУБЧАНІН**

*аспірант кафедри технології виробництва  
літальних апаратів факультету літакобудування  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна  
e-mail: y.i.trubchanin@khai.edu,  
ORCID: 0000-0003-3949-0791*

**Катерина МАЙОРОВА**

*кандидатка технічних наук, доцентка,  
завідувачка кафедри технології виробництва літальних апаратів  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна  
e-mail: k.majorova@khai.edu,  
ORCID: 0000-0003-3949-0791*

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУПЕРФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ МАШИНОБУДІВНИХ ДЕТАЛЕЙ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЯКОСТІ**

**Анотація:** Предметом дослідження є технології суперфінішного оброблення машинобудівних деталей. Метою дослідження є удосконалення технології суперфінішного оброблення таких деталей. Показано, що найбільш поширеним процесом виробництва авіаційних деталей типу «золотник» є електрохімічне оброблення (ЕХО). Надано переваги методу ЕХО серед інших електричних методів таких, як: простота додавання великих сил струму, що забезпечують високу продуктивність, майже повну відсутність зносу інструмента, порівняно високий клас чистоти обробленої поверхні. Окремо виділено особливості конвергенційної технології, що об'єднує декілька методів суперфінішного оброблення. Виконано аналіз експериментів деталей типу «циліндр» та «золотник» за параметрами шорсткості та округлення крайок. Визначено перспективи апробації конвергенційної технології на зношених високоточних деталях шляхом нанесення на оброблені поверхні наноматеріалів. Отримані дані можуть послужити основою для створення рекомендацій щодо створення технології відновлювального ремонту таких деталей.

**Ключові слова:** суперфінішне оброблення, деталь, ресурс, прецизійна точність.

## **IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SUPERFINISHING PROCESSING OF MACHINE-BUILDING PARTS WITH THE PURPOSE OF INCREASE IN THEIR QUALITY**

**Abstract:** The subject of research is the technology of superfinishing of machine-building parts. The purpose of the research is to improve the technology of superfinishing of such parts. It is shown that the most common process for the production of aircraft parts of the "spool" type is electrochemical processing (ECHO). The advantages of the ECHO method among other electrical methods are presented, such as: ease of adding large currents that ensure high productivity, almost complete absence of tool wear, relatively high class of cleanliness of the treated surface. The features of the convergence technology, which combines several methods of superfinishing, are highlighted separately. The analysis of the experiments of the "cylinder" and "spool" type details was carried out according to parameters of roughness and rounding of the edges. Prospects for the approbation of convergence technology on worn high-precision parts by applying nanomaterials to

the treated surfaces have been determined. The obtained data can serve as a basis for creating recommendations for the creation of technology for the restorative repair of such parts.

**Keywords:** superfinish, detail, resource, precision accuracy.

Прецизійна точність виробництва машинобудівних деталей досягається шляхом використання прецизійними верстатами та багатьох технологій: механічної та різних видів термічної обробок, а також хімічних або електрохімічних процесів та контролю якості. Так, наприклад, для деталей типу «золотники» допуск овальності, конусності та биття робочих поверхонь відносно центрів складає 0,002 мм. Така прецизійна точність досягається не ручним або шліфувальним обробленням, а електрохімічними процесами, що виконуються на передостанніх етапах виготовлення високоточних деталей типу «золотник». Це дозволяє зменшити трудомісткість виготовлення, підвищити точність виконання розмірів, зменшити кількість контрольних операцій в порівнянні з ручною механічною обробкою, що неодмінно вплине на собівартість продукції

Технологія для оброблення високоточних деталей авіаційного виробництва електрохімічним обробленням (ЕХО) є більш поширена. Особливими перевагами ЕХО серед інших схожих електричних методів 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 країв 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.

Найбільше поширення одержала операція електрохімічного формоутворення для оброблення профілю пера робочих лопаток парових і газових турбін, в основному з важкооброблюваних сплавів. 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 обробки в цьому випадку досить не велика і складає 0,2...0,4 мм.

ЕХО на сьогодні є практично єдиним методом прошивання глибоких отворів малого діаметра, наприклад, охолоджуваних каналів у важкооброблюваних жароміцних матеріалах

робочих лопаток газових турбін. 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 емалями. 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/мм<sup>2</sup>. Подача електрода складає 1,5...12 мм/хв. Вимоги щодо точності форми отворів залежить від точності обробки торця електрода й досягає  $\pm 0,025$  мм.

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. В цьому випадку 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. Слід відзначити, що суперфінішування впливає тільки на мікрогеометрію деталі. 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 [1] доведено, що поверхнева шорсткість зменшується за перші 10 с на 57,9%, другі – 17,6%, треті – 12,9%, четверті – 2,3%.

При суперфінішуванні завжди обертається деталь, а у хонінгуванні – інструмент. Швидкий зворотно-поступальний рух брусків за короткий хід – основна характеристика, що відрізняє суперфінішне оброблення від хонінгування. 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 обробка крайок, канавок та операції пасивування та очищення виконуються з використанням інших процесів. Альтернативою є дослідження, представлені в [2], авторів даної статті, де запропоновано єдину комплексну конвергенційну 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 [3]. Велике значення при цьому приділяється сумісному обробленні як робочих поверхонь деталі, так і досягнення необхідної геометричної точності її поверхонь, а також необхідного стану крайок, які мають дуже важливу роль у функціонуванні деталей, наприклад, золотникових пар. Експеримент дозволив установити, що реалізується легке видалення продуктів окислення, зберігаючи чистоту поверхні деталей.

Дослідження за електросуперфінішем сфокусованим током, представленої в роботах [1-2] на деталях з канавками з метою імітації обробки золотників, показали також позитивні результати. Дослідження проводилось на макетах золотника діаметром 8 мм з нержавіючої сталі (рис. 1). На кромках золотника 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 обробки, а також видалення задирок на робочих поверхнях золотника.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд зразка типу «золотник»

Експериментальні дослідження проводили на установці для електрохімічного оброблення деталей невеликих габаритів у стаціонарному електроліті моделі ЕЗІ-2М. Обробка 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. 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 %.

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. Але в цілому для всіх поверхонь спостерігається однакова тенденція зменшення шорсткості, яка становить в середньому 0,2...0,25 мкм за 10-11 хвилин.

Дослідження проводилось також щодо якості поверхонь деталі та кромки, які утворювались на межах перетину робочих поверхонь золотника і поверхонь канавок, які утворювались при механічній обробці цих поверхонь. Аналіз отриманих результатів дозволив установити ефективні зміни в якості всіх поверхонь, канавок та кромки, які утворювались на межах перетину робочих поверхонь дослідного зразка типу золотник. В ході експерименту видно характерний здвиг кромки, утворений при формуванні канавки і її зменшення після електросуперфінішної обробки майже в 2 рази. З експерименту досить ясно видно утворення задирок вдовж кромки після механічної обробки і їх розчинення після обробки. Цей факт підтверджується і утворенням канавок, а також зникненням задирів після оброблення. Цей факт доводить закруглення гострих кутів кромки, що є результатом концентрації щільності току у місцях загострення форми або її локалізації. Максимальна нерівність робочої поверхні коливається в межах 376...638 нм до обробки та 432...545 нм після обробки. Ці дані добре погоджуються з даними таблиці 1.

Таким чином запропонований процес сумісної обробки 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, де ефективність процесу реалізується на перших хвилинах оброблення при одночасному поліпшенні шорсткості робочих поверхонь, закругленні кромки та ліквідації мікрозадирок після механічної обробки.

Отримані результати експериментів підтвердили позитивність досліджень робіт, що набули продовження на зразках високоточних деталей типу золотник. Так завдяки використанню нової електросуперфінішної обробки 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. 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.

#### **Список використаних джерел:**

1. Experimental research of electrofinishing processing of height precision parts as a composition of convergence technology / V. Sikulskyi, K. Maiorova, S. Krasovskyi, O. Rebrin, A. Viktor // In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). Integrated Computer Technologies

in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023. December 28, 2023. – Kharkiv, Ukraine: National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

2. Сікульський В. Т., Майорова К. В., Красовський С. О., Суслов А. С., Трубчанін Ю. І. Експериментальні дослідження електросуперфінішної обробки сфокусованим струмом високоточних деталей авіаційного виробництва / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, С. О. Красовський, А. С. Суслов, Ю. І. Трубчанін // Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2023. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», № 6(192), с. 66-75.

3. Пат. на корисну модель № 153805 Україна, МПК (2006.1) B23H 3/04. Спосіб електрохімічної обробки металевого виробу / В.Т. Сікульський, К.В. Майорова, А.С. Морголенко, А.С. Суслов, С.О. Красовський (Україна); заявник й патентовласник Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № u2023 00908, заявл. 07.03.2023; затверджено 30.08.2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1756063/>