П. Р. ТРИШИН, Н. В. ГОНЧАР, К. О. ТЕРЕЩЕНКО*Національний університет «Запорізька політехніка», Україна***АВТОМАТИЗАЦІЯ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ПРЯМОКУТНИХ КУТОВИХ ХВИЛЕВОДІВ S-ДІАПАЗОНУ**

Фінішна обробка хвильоводів (притуплення гострих крайок, видалення задирок, полірування місць зварювання або пайки каналу та фланців) проводиться з метою усунення всіх дефектів поверхні, які утворилися на попередніх операціях, і надання їй необхідної шорсткості, яка впливає на величину активних втрат потужності. В більшості випадків прямокутних хвильоводів складної просторової форми з кутовими зварними переходами, фінішне оброблення каналів хвильоводів є анодно-абразивне вібраційне хонінгування, абразивно-екструзійна обробка, обробка на спеціальних притиральних верстатах, гідроабразивне прокачування. Ці методи відрізняються низькою продуктивністю, вимагають складного обладнання, мийку оброблених поверхонь, та застосовуються лише до прямих хвильоводів або тих, які мають плавний вигин. Попередні дослідження полірування каналу хвильоводів йоржиковою полімерно-абразивною щіткою показали хороші результати щодо шорсткості, продуктивності та електропараметрів. Для автоматизації фінішної обробки хвильоводів, що мають прямолінійну форму або один простий прямокутний згин, було запропоновано виконувати її на горизонтально-фрезерному верстаті з ЧПК. Для обробки хвильоводів послідовно застосовували два типи полімерно-абразивних щіток фірми «Osborn»: йоржикову та кінцеву. Обробка передбачала полірування каналу в місцях зварних швів та фланцю, видалення задирок безпосередньо після механічної обробки на тому ж верстаті, на якому виконувалось фрезерування фланців хвильоводів. Також для механізації фінішної обробки хвильоводів складної конструкції (більш одного згину) запропоновано замінити операцію послідовного ручного полірування за допомогою засобів малої механізації на полірування на спеціальній установці. Траєкторія руху інструменту забезпечувалась копіром. Ця установка також забезпечує визначений натяг автоматично та має можливість коректувати його через поступове зношення інструменту. В результаті вдосконалення фінішної обробки повністю було видалено ручне полірування хвильоводу, геометрія та шорсткість каналу значно покращилися. Розроблення спеціального устаткування дозволило значно (в 3 ... 5 разів) скоротити час та зменшити людський вплив на точність обробки.

Ключові слова: прямокутний кутовий хвильовід; фінішне оброблення; автоматизація; полімерно-абразивна щітка; полірування зварних швів.

Вступ

В радіолокаційних станціях (РЛС) S-діапазону застосовуються прямокутні хвильоводи з численними вигинами та поворотами. Існують два типи вигинів хвильоводу: плавний, виконаний згинанням хвильоводної труби, та кутовий, виготовлений методом зварювання або паяння секцій хвильоводної труби. Кутові вигини більш компактні, тому їх здебільшого використовують в РЛС, проте вони мають багато зварних або паяних швів. Основним методом зварювання або паяння для кутових хвильоводів через складну конструкцію та дрібносерійне виробництво залишається ручний. Технологія виготовлення включає наступні етапи: поступово з'єднують секції хвильоводної труби між собою та приєднують фланці, канал в зоні шва кожного разу після з'єднання двох складових частин рихтують та полірують; після чого виконують

дорнування та полірування каналу з боку фланців на довжині 40...45 мм; фрезерування та свердлення фланців; зачистку задирок; полірування фланців. В якості матеріалів для їх виготовлення використовується алюміній (АД0, АМГ6, АД31) та латунь (Л63, Л96).

Як відомо, величина активних втрат у хвильоводі істотно залежить від якості оброблення (переважно шорсткості), відсутності дефектів від попереднього оброблення і стабільності форми перерізу поверхні каналу. Відповідно до конструкторської документації точність, розмірів перерізу хвильоводів РЛС виконується по 9 квалітету. Канал хвильоводної труби в стані поставки має шорсткість до Ra 0,6 мкм, немає припуску та не потребує додаткової обробки. Розрахункова шорсткість каналу хвильоводу для мінімальних втрат потужності електромагнітної хвилі має становити не більше Ra 0,8 мкм [1], але в місцях зварних (паяних)

швів у зв'язку зі складністю оброблення існуючими методами мікронерівності поверхні досягають значень Ra 3,2 мкм. Це призводить до часткового загасання потужності хвиль при проходженні каналом, викликане збільшенням шляху струмів високої частоти в поверхневому шарі стінок, та зменшує коефіцієнт корисної дії РЛС в цілому.

1. Аналіз проблеми, формулювання мети дослідження

Фінішне оброблення хвилеводів (притуплення гострих крайок, видалення задирок, полірування місць зварювання або паяння каналу та фланців) є остаточним етапом їх виробництва та проводиться з метою усунення всіх дефектів поверхні, які утворилися на попередніх операціях, і надання їй необхідної шорсткості. Операції фінішної обробки становлять до 20% загальної трудомісткості виготовлення деталей. Ці операції виконують вручну або із застосуванням засобів малої механізації. Частка ручної праці, відповідальної та монотонної при оброблюванні каналу хвилеводів – велика і вимагає невпинної уваги робітника.

Особливості, які необхідно враховувати при виборі методу фінішного оброблення прямокутного каналу хвилеводу, такі:

1) мінімізація силового тиску на оброблювані поверхні (товщина стінки хвилеводу – 1,5...2,5 мм);

2) наявність важкодоступних місць для обробки в глибині каналу хвилеводу (місця переходів, вигинів);

3) метал хвилеводів має низьку твердість (алюміній – $20 \cdot 10^{-1} \text{HB}$, латунь – $70 \cdot 10^{-1} \text{HB}$).

Аналіз відомих фінішних методів оброблення хвилеводів показав, що для досягнення необхідної шорсткості поверхні використовуються трудомісткі методи оброблення, найчастіше використовують 2-3 методи одночасно (наприклад, механічний і хімічний).

Для фінішного оброблення каналів хвилеводів використовують анодно-абразивне вібраційне хонінгування [2, 3], яке полягає в використанні електроліту з пасивуючими добавками для анодного видалення гребінців нерівностей. Активізація гребінців поверхні здійснюється вібрацією еластичного абразивонесучого інструменту, в який інтегровано катод. Такий метод дозволяє забезпечити низьку рівномірну шорсткість оброблюваної поверхні, усунути шаржування і зберегти вихідну точність. Однак даний метод є непродуктивним і застосовується лише до прямих хвилеводів або до тих, які мають плавний вигин.

У працях [4 - 6] для полірування кутових

хвилеводів застосовують абразивно-екструзійне оброблення. Аналіз даного процесу показав, що при обробці каналів великої довжини або з вигинами якість обробленої поверхні часто неоднорідна через значні зміни характеру течії робочого середовища. Головним недоліком є необхідність пристосування, яке не дасть стінкам хвилеводу деформуватися під час оброблення. Цей метод також відрізняється низькою продуктивністю і необхідністю мийки оброблених поверхонь.

При фінішному обробленні хвилеводів міліметрового діапазону часто застосовуються спеціальні притиральні верстати. В роботі [1] для полірування каналу хвилеводу використовують еластичний поліуретановий притир з нанесеною на поверхню алмазною пастою. Перевага даного інструменту полягає в тому, що абразивні зерна пружно переміщуючись вглиб основи, не утворюють глибоких рисок на поверхні. Багаторазове поздовжнє переміщення притиру всередині профілю здійснювалось рідким робочим середовищем під тиском в обидві сторони хвилеводу, за рахунок чого досягалась необхідна шорсткість. Так само для полірування каналу використовують повстяні або фетрові полірувальники [7], що представляють собою вкладиші, просочені абразивними пастами, пересування яких здійснюється тиском повітря. Недоліками даних методів є необхідність запобігання деформації стінок хвилеводу під час руху інструмента під тиском, непродуктивність оброблення, шаржування поверхні абразивними зернами. Після полірування порожнини хвилеводів повністю по всьому об'єму покриваються абразивної масою, що вимагає додаткового очищення [8].

Електрохімічне полірування хвилеводів передбачає здійснення робіт методом паралельного хімічного і електричного впливів. Повністю замінити механічне полірування даний метод не може, тому що не здатний видалити глибокі подряпини, а тільки згладжує їх мікропрофіль. При електрополіруванні можуть розкриватися пори і тріщини в місцях зварювання, в які просочується електроліт, а згодом випаровуючись, руйнує поверхню навколо них.

Одним з ефективних методів фінішного оброблення каналів хвилеводів є гідроабразивне прокачування [9, 10], яке являє собою процес ерозії потоком абразивних часток. Гідроабразивна суспензія прокачується через виріб в обох напрямках, створюючи спрямовану шорсткість, яка залежить від розміру і концентрації абразивних зерен. До недоліку даного методу оброблення можна віднести нерегульовану ерозію при великій концентрації абразиву і високій швидкості потоку;

перетин оброблюваного каналу регламентується потужністю гідросистеми обладнання.

В більшості випадків, фінішне оброблення прямокутного каналу хвиеводів виконується вручну або засобами малої механізації, в якості інструменту використовують наждачний папір, шарошки, напилки. При поліруванні деталей встановлюють в лещатах і вручну провертають після обробки кожного боку. Для досягнення необхідної шорсткості використовують по черзі наждачний папір різної зернистості. Даний вид оброблення має високу трудомісткість та не забезпечує необхідну шорсткість в глибині каналу. Також використовуваний інструмент має низьку стійкість і потребує частой заміни. За результатами досліджень [11] з широкого переліку абразивних інструментів, одним з найбільш ефективних для фінішної обробки прямокутних кутових хвиеводів S-діапазону є полімерно-абразивні щітки (ПАЩ).

ПАЩ застосовуються для автоматизації широкого спектра фінішної обробки деталей, замінюють застарілі, менш продуктивні, неекологічні методи. Наприклад, при видаленні задирок на деталях порошкової металургії [12] та газотурбінних двигунів [13], при механічному матуванні скла замість піскоструминної або хімічної обробки [14, 15]. Також ПАЩ використовують для оптимізації технологічного процесу токарного оброблення зовнішньої і внутрішньої гвинтової поверхні [16]. У роботах [17, 18] запропоновано шліфування напрямних замінити фрезеруванням на верстаті з ЧПК з подальшим поліруванням ПАЩ на цьому ж верстаті без зняття деталі. У статті [19] описується використання ПАЩ для обробки симетричних і асиметричних крайок різальних інструментів. Застосування ПАЩ при автоматизованих фінішних операціях [20] дозволяє істотно збільшити продуктивність оброблення, про-

дукції [21]. Дослідження полірування каналу хвиеводів йоржиковою ПАЩ [22, 23] показали хороші результати щодо електропараметрів.

Мета дослідження – механізація та автоматизація фінішних операцій виготовлення кутових прямокутних хвиеводів S-діапазону зі зварними або паяними швами за допомогою використання щіткових полімерно-абразивних інструментів обертальної дії.

2. Виклад основного матеріалу і аналіз отриманих результатів

Для автоматизації фінішної обробки хвиеводів (рис. 1), що мають прямолінійну форму або один простий прямокутний згин, було запропоновано виконувати її на горизонтально-фрезерному верстаті з ЧПК (рис. 2). Для обробки хвиеводів послідовно застосовували два типи ПАЩ фірми «Osborn» [24]: йоржикову та кінцеву.

Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних хвиеводів

Оброблення передбачало полірування каналу в місцях зварних швів та фланцю, видалення задирок безпосередньо після механічної обробки на тому ж верстаті, на якому виконувалось фрезерування фланців хвиеводів. Для цього було запропоновано встановлення деталі в спеціальне пристосування (рис. 3) для фрезерування.

Рис. 2. Обробки щітковими інструментами хвиеводу на верстаті з ЧПК

Рис. 3. Пристосування для оброблення хвильоводів на верстаті з ЧПК

Центрування деталі за допомогою тимчасового установа 2 здійснювали по каналу, який попередньо дорнували на глибину 40...50 мм.

Установ 2 базували в корпусі 1 за допомогою штифтів 5 та фіксували затискачами 6. Деталь притискали до упорів 3 і закріплювали по фланцю затискачем 4 з двох боків. Установ 2 знімали, і далі деталь оброблювали за програмою. Після оброблення першого фланцю здійснювали переустановлення деталі для оброблення наступного фланцю.

Автоматизоване оброблення на верстаті з ЧПК дозволило виключити проміжні слюсарні операції, зменшити час виготовлення та збільшити якість та точність оброблення виробу. Результатом п'яти проходів кожної ПАЩ на раціональних режимах (швидкість – $V=20$ м/с, натяг – $i=1$ мм, подача –

$S=1$ м/хв) стало повне видалення дефектів поверхні після попередніх операцій, шорсткість становила $Ra 0,65...0,83$ мкм.

Для механізації фінішного оброблення хвильоводів складної конструкції (більш одного згину) запропоновано замінити операцію послідовного ручного полірування за допомогою засобів малої механізації на полірування ПАЩ на спеціальній установці (рис. 4, 5).

В даній установці рух інструменту виконувався вручну, а траєкторія руху забезпечувалась копіром. Кінематика руху установки схожа з роботою гравіювального копіювально-фрезерного верстату.

Для обробки хвильоводів використовували той самий інструмент, що і в попередньому випадку зі швидкістю оброблення $V=18...22$ м/с.

Рис. 4. Схематичне зображення спеціальної установки

Механізована установка для фінішного оброблення хвилеводів являла собою конструкцію, яка монтувалась на верстаку. Оброблювана деталь 6 встановлювалась на санчата 1 і фіксувалась гвинтовим затискачем 2. Санчата мали можливість поздовжнього переміщення по напрямних 3, яке обмежувалось упорами 4.

Рис.5. Обробки щітковим інструментом хвилеводу на спеціальній установці

Для встановлення необхідного переміщення деталі 6 відносно щітки 5 упори 4 мали можливість перезакріплення. У шпиндель 8 установки встановлювали щітку 5 і затискали у цанговому патроні 7. При обробці деталь 6 на санчатах 1 переміщався в бік шпинделя 8 і щітка 5 позиціонувалась в оброблювальній зоні каналу. Оберти шпинделя 8 забезпечував двигун 10 через ремінну передачу 16.

Натяг ременів та утримання шпинделя 8 забезпечував гнучкий важіль 17. Шляхом плавного переміщення ручки 9 у вертикальній і горизонтальній площині по прямокутній траєкторії здійснювалась обробка каналу. При необхідності також переміщували деталь 6 на санчатах 1 до шпинделя або від нього, для збільшення площі обробки. Рухи по прямокутному контуру шпинделя 8 обмежувалися важелями 11, 13, 14, 15, копіром 12. Копір 12 являв собою прямокутний отвір з заокругленими кутами, а ролик 18, рухаючись по ньому, імітував рух щітки 5. Шляхом зміни положення рухомих важелів 13, 15 встановлювали необхідний натяг щітки 5 за рахунок масштабування траєкторії руху. Дана установка є універсальною і може використовуватись для оброблення хвилеводів

іншої форми перерізу шляхом встановлення відповідного копіру.

Результатом обробки запропонованими методами стало повне усунення всіх дефектів поверхні каналу околешовних зон. Після чого на дослідних зразках була виміряна шорсткість оброблених поверхонь профілометром моделі 171621 (табл. 1). Також був проведений хронометраж часу фінішної обробки зразків хвилеводів. На основі отриманої трудомісткості була розрахована собівартість фінішного оброблення (табл. 2) наждачним папером (варіант 1), ПАЩ на верстаті з ЧПК (варіант 2) та на механізованій установці (варіант 3).

Таблиця 1
Середнє значення шорсткості при обробленні дослідних хвилеводів

Тип інструменту (зернистість)	Шорсткість Ra, мкм	
	Повздовжня	Поперечна
Наждачний папір (F120)	2,11	1,92
Полімерно-абразивна йоржикова щітка (F120)	1,28	1,03
Полімерно-абразивна йоржикова щітка (F180)	1,02	0,76

Таблиця 2
Розрахунок економічної ефективності фінішного оброблення дослідних хвилеводів

Параметр	Варіант оброблення хвилеводів		
	1	2	3
Основний час обробки, хв	28	5,14	12,5
Допоміжний час, хв	27,2	10,2	7,4
Додатковий час, хв	5,52	1,53	1,99
Штучний час, хв	60,72	16,87	21,89
Витрати на електроенергію, грн	0,59	3,17	0,53
Витрати на інструмент, грн	11,36	0,36	0,37
Річна програма випуску хвилеводів, шт/рік	640	640	640
Амортизаційні відрахування, грн	16,10	9,38	31,25
Заробітна плата, грн	54,08	11,27	14,62
Податкові нарахування, грн	21,36	4,45	5,78
Премія, грн	10,82	2,25	2,92
Собівартість, грн	114,3	30,89	55,47
Економічний ефект від впровадження, раз	-	3,7	2

Висновки

В результаті впровадження фінішної обробки на верстаті з ЧПК та на механізованій установці за допомогою ПАЩ було повністю видалено ручне полірування хвилеводу з технологічного процесу виготовлення кутових хвилеводів, геометрія та

шорсткість каналу значно покращились (див. табл. 1).

Автоматизація процесу за допомогою верстату з ЧПК на трьох типах дослідних зразків хвильоводів дозволила скоротити більше, ніж у 5 разів тривалість і 3,7 рази собівартість фінішної обробки (див. табл. 2) в порівнянні з обробкою наждачним папером. А впровадження спеціальної механізованої установки для фінішної обробки хвильоводів за допомогою ПАЩ скоротило в 2,2 рази час полірування та в 2 рази собівартість (див. табл. 2), людський вплив на точність і якість оброблення.

Грунтуючись на отриманих результатах, можна рекомендувати оброблення прямокутних хвильоводів S-діапазону ПАЩ обертальної дії, як альтернативний фінішний етап виготовлення хвильоводів РЛС.

Література

1. Зверинцева, Л. В. Инструмент для абразивного полирования внутренней поверхности волноводов космических аппаратов [Текст] / Л. В. Зверинцева // Вестник СибГАУ. – 2008. – Т. 1, № 18. – С. 162–166.
2. Пат. 2588953 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 Н 5/06, В 23 Н 9/14. Способ анодно-абразивного полирования отверстий [Текст] / Трифанов И. В., Оборина Л. И., Рыжов Д. Р., Сулягин А. В., Малько Л. С., Трифанов В. И. ; заявитель и патентообладатель Сибирский гос. аэрокосм. ун-т им. акад. М. Ф. Решетнева. – № 2014149535/02 ; заявл. 08.12.2014 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. – 11 с. : ил.
3. Грачева, М. А. Технологическое обеспечение качества поверхности каналов волноводных изгибов анодно-абразивным полированием [Текст] / М. А. Грачева, И. В. Трифанов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2016. – Т. 2, №12. – С. 141–143.
4. Зверинцев, В. В. Устройство для абразивно-экструзионной обработки коротких волноводов сантиметрового диапазона [Текст] / В. В. Зверинцев, Л. В. Зверинцева, С. К. Сыроев, Д. В. Чураков // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф., Красноярск, 11–14 ноября 2014 г. – Красноярск, 2014. – Т.1 – С. 398–400.
5. Hybrid abrasive flow machining for nano finishing – a review [Text] / P. Ali, S. Dhull, R.S. Walia et al // Materials Today: Proceedings. – 2017. – vol. 4. – no. 8. – P. 7208-7218. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.048.
6. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining [Text] / H. Wei, C. Peng, H. Gao et al // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2019. – vol. 138. – P. 66-79. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003.
7. Отделка внутренних поверхностей волноводов для космических аппаратов [Текст] / Д. В. Зверинцева, А. С. Сыроев, С. К. Сыроев, П. А. Юнг // Вестник СибГАУ. – 2006. – № 4. – С. 56–59.
8. Исследование процесса обезжиривания латунных волноводов сложной формы после полирования абразивной средой [Текст] / В. А. Кочкина, О. И. Багаева, Л. В. Зверинцева, Г. В. Кочкина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т.1. – С. 925–927.
9. Pal, P. Computational simulation of abrasive flow machining for two dimensional models [Text] / P. Pal, K. K. Jain // Materials Today: Proceedings. – 2018. – vol. 5. – no. 5(2). – P. 12969-12983. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.282.
10. «Ванорблест» – российское предприятие, ведущий разработчик и производитель в России оборудования для гидроабразивной прокачки (жидкий напильник) и гидродробебетной очистки (бескислотного травления) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vaporblast.ru>. – 04.08.2020.
11. Research of quality of a current conductive surface of aluminum waveguides at polishing with various methods [Text] / P. R. Tryshyn, N. V. Honchar, T. N. Semeryuk et al // International scientific and practical conference technical sciences: history, the present time, the future, EU experience, September 27-28 2019. – Wloclawck, Republic of Poland, 2019. – P. 140–143.
12. Fultz, D. M. Abrasive filament brush deburring of powdered metal components [Электронный ресурс] / D. M. Fultz. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.6713&rep=rep1&type=pdf>. – 04.08.2020.
13. Макаров, В. Ф. Автоматизированное скругление и полирование острых кромок деталей газотурбинных двигателей полимерными абразивными щетками [Текст] / В. Ф. Макаров, А. В. Виноградов, А. С. Нуртдинов // СТИН. – 2011. – №10. – С. 27–33.
14. Possibilities of robot application for glass mechanical frosting by an abrasive composite brush [Text] / M. Stary, F. Novotny, M. Horak et al // Procedia CIRP. – 2018. – vol. 77. – P. 134–138. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.251.
15. Summary of the properties and benefits of glass mechanically frosted with an abrasive brush [Text] / M. Stary, F. Novotny, M. Horak et al // Construction and Building Materials. – 2019. – vol. 206. – P. 364–374. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.062.
16. Проволоцкий, А. Е. Технологические возможности полимер-абразивного инструмента [Текст] / А. Е. Проволоцкий, С. Л. Негзуб // Наукові праці Донецького національного тех. ун-ту. – 2004. – № 71. – С. 125–133.
17. Raymond, N. Surface polishing of hardened grey cast iron with a compliant abrasive filament tool

[Text] / N. Raymond, M. Soshi // *Procedia CIRP*. – 2016. – vol. 46. – P. 205–208. DOI:10.1016/j.procir.2016.03.193.

18. Raymond, N. A Study on the effect of abrasive filament tool on performance of sliding guideways for machine tools [Text] / N. Raymond, M. Soshi // *Procedia CIRP*. – 2016. – vol. 45. – P. 223–226. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.169.

19. Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting tools using brushing tools with filament-integrated diamond grits [Text] / T. Bergs, S. A. M. Schneider, M. Amara et al // *Procedia CIRP*. – 2020. – vol. 93. – P. 873–878. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.028.

20. Fultz, D. M. Fiber abrasive finishing systems for end-deburring extruded aluminum profiles [Електронний ресурс] / D. M. Fultz. – Режим доступу: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00680348/49640.pdf>. – 04.08.2020.

21. Kannan, S. Experimental investigation of surface integrity during abrasive edge profiling of nickel-based alloy [Text] / S. Kannan, L. Kui // *Journal of manufacturing processes*. – 2019. – vol. 39. – P. 40–51. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.01.052.

22. Гончар, Н. В. Влияние полученной неоднородной шероховатости при полировании канала прямоугольного волновода на его электропараметры [Текст] / Н. В. Гончар, П. Р. Тришин // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2020): матеріали тез доповідей X Міжнар. наук.-практ. конф., Чернівці, 29-30 квітня 2020 р. – Чернівці, 2020. – Т. 1. – С. 131–132.

23. Тришин, П. Р. Вплив наклепу при фінішній обробці на електропровідність робочого шару каналу хвильоводів [Текст] / П. Р. Тришин, Н. В. Гончар // Інженерія поверхності та реновація izdelij: матеріали тез докладів 20-й Міжнарод. науч.-тех. конф., 01-05 юня 2020 г. – Київ, 2020. – С. 123-124.

24. OSBORN Product catalogue 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.figra.hu/download/osbornkat.pdf>. – 04.08.2020.

References

1. Zverinceva, L. V. Instrument dlja abrazivnogo polirovaniya vnutrennej poverhnosti volnovodov kosmicheskikh apparatov [Tool for abrasive polishing of the inner surface of spacecraft waveguides]. *Vestnik SibGAU*, 2008, vol. 1, no. 18, pp. 162–166.

2. Trifanov, I. V., Oborina, L. I., Ryzhov, D. R., Sutjagin, A. V., Mal'ko, L. S., Trifanov, V. I. *Sposob anodno-abrazivnogo polirovaniya otverstij* [Method of anodic-abrasive polishing of holes]. Patent RF, no. 2588953, 2014.

3. Gracheva, M. A., Trifanov, I. V. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva poverhnosti kanalov volnovodnyh izgibov anodno-abrazivnym polirovaniem [Technological assurance of the surface quality of the

channels of waveguide bends by anodic-abrasive polishing]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, Vol. 2, no. 12, pp. 141–143.

4. Zverincev, V. V., Zverincev, L. V., Sysoev, C. K., Churakov, D. V. Ustrojstvo dlja abrazivno-jekstruzionnoj obrabotki korotkih volnovodov santimetrovogo diapazona [Device for abrasive-extrusion processing of short centimeter waveguides]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf., Krasnoyarsk, 11–14 noyabrya 2014 h.* [Reshetnev Readings: Materials of the KhVII Mezhdunar. scientific. Conf., Krasnoyarsk, November 11-14, 2014]. Krasnojarsk, 2014, vol. 1, pp. 398–400.

5. Ali, P., Dhull, S., Walia, R.S., Murtaza, Q., Tyag, M. Hybrid abrasive flow machining for nano finishing – a review. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, no. 8, pp. 7208-7218. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.048.

6. Wei, H., Peng, C., Gao, H., Wang, X., Wang, X. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, vol. 138, pp. 66-79. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003.

7. Zverinceva, D. V., Sysoev, A. S., Sysoev, S. K., Jung, P. A. Otdelka vnutrennih poverhnostej volnovodov dlja kosmicheskikh apparatov [Interior surface finishing of waveguides for spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2006, no. 4, pp. 56–59.

8. Kochkina, V. A., Bagaeva, O. I., Zverinceva L. V., Kochkina, G. V. Issledovanie processa obezhirivaniya latunnyh volnovodov slozhnoj formy posle polirovaniya abrazivnoj sredoj [Investigation of the process of degreasing brass waveguides of complex shape after polishing with an abrasive medium]. *Aktual'nye problem aviatsii i kosmonavтики*, 2016, vol. 1, pp. 925–927.

9. Pal, P., Jain K. K. Computational simulation of abrasive flow machining for two dimensional models. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 5(2), pp. 12969-12983. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.282.

10. «Vaporblast» – rossijskoe predpriyatje, vedushhij razrabotchik i proizvoditel' v Rossii oborudovaniya dlja gidroabrazivnoj prokachki (zhidkij napil'nik) i gidrodrobemetnoj ochistki (beckislotnogo travlenija) ["Vaporblast" is a Russian company, a leading developer and manufacturer in Russia of equipment for water jet pumping (liquid file) and hydroblast cleaning (acid-free etching)]. Available at: <http://vaporblast.ru/> (accessed 04.08.2020).

11. Tryshyn, P. R., Honchar, N. V., Semeryuk T. N., Tereshchenko, K. A. Research of quality of a current conductive surface of aluminum waveguide sat polishing with various methods. *International scientific and practical conference technical sciences: history, the present time, the future, EU experience: book of abstracts*, Wloclawck, 2019. pp. 140–143.

12. Fultz, D. M. *Abrasive filament brush deburring of powdered metal components*. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.6713&rep=rep1&type=pdf> (accessed 04.08.2020).
13. Makarov, V. F., Vinogradov, A. V., Nurtdinov, A. S. Avtomatizirovannoe skruglenie i polirovanie ostrykh kromok detalej gazoturbinnnyh dvigatelej polimernymi abrazivnymi shhetkami [Automated rounding and polishing of sharp edges of gas turbine engine parts with polymer abrasive brushes]. *STIN*, 2011, no. 10, pp. 27–33.
14. Sary, M., Novotny, F., Horak, M., Stara, M. Possibilities of robot application for glass mechanical frosting by an abrasive composite brush. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 134–138. DOI: 10.1016/J.PROCIR.2018.08.251.
15. Sary, M., Novotny, F., Horak, M., Stara, M. Summary of the properties and benefits of glass mechanically frosted with an abrasive brush. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 206, pp. 364–374. DOI: 10.1016/J.Conbuildmat.2019.02.062.
16. Provolockij, A. E., Negrub, S. L. Tehnologicheskie vozmozhnosti polimer-abrazivnogo instrumenta [Technological capabilities of polymer-abrasive tools]. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo teh. un-tu*, 2004, no. 71, pp. 125–133.
17. Raymond, N., Soshi M. Surface polishing of hardened grey cast iron with a compliant abrasive filament tool. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 205–208. DOI:10.1016/j.procir.2016.03.193.
18. Raymond, N., Soshi M. A Study on the effect of abrasive filament tool on performance of sliding guideways for machine tools. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 45, pp. 223–226. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.169.
19. Bergs, T., Schneider, S. A. M., Amara, M., Ganser, P. Preparation of symmetrical and asymmetrical cutting edges on solid cutting tools using brushing tools with filament-integrated diamond grits. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 93, pp. 873–878. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.028.
20. Fultz, D. M. *Fiber abrasive finishing systems for end-deburring extruded aluminum profiles*. Available at: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00680348/49640.pdf>. (accessed 04.08.2020).
21. Kannan, S., Kui, L. Experimental investigation of surface integrity during abrasive edge profiling of nickel-based alloy. *Journal of manufacturing processes*, 2019, vol. 39, pp. 40–51. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.01.052.
22. Gonchar, N. V., Tryshyn, P. R. Vliyanie poluchennoj neodnorodnoj sherohovatosti pri polirovanii kanala prjamougol'nogo volnovoda na ego jelektroparametry [Influence of the obtained inhomogeneous roughness during polishing of a rectangular waveguide channel on its electrical parameters]. *Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system (KZYATPS – 2020): materialy tez dopovidey X Mizhnar. nauk.-prakt. konf., Chernihiv, 29–30 kvitnya 2020 r.* [Integrated quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2020): materials of abstracts of the X International Scientific and Practical Conference, Chernihiv, April 29–30, 2020]. Chernigiv, 2020, vol. 1, pp. 131–132.
23. Tryshyn, P. R., Gonchar, N. V. Vplyv naklepu pry finishniy obrobtisi na elektroprovodnist' robochoho sharu kanalu khvylevodiv [Influence of hardening during finishing on the electrical conductivity of the working layer of the waveguide channel]. *Inzheneriya poverhnosti i renovacija izdelij: materialy tez dokladov 20-j Mezhdunar. nauch.-teh. konf., 01–05 iyunja 2020 h.* [Surface engineering and product renovation: abstracts of the 20th International Scientific and Technical Conference, June 01–05, 2020], Kiev, 2020, pp. 123–124.
24. *OSBORN Product catalogue 2016*. Available at: <http://figra.hu/download/osbornkat.pdf> (accessed 04.08.2020).

Надійшла до редакції 09.10.2020, розглянута на редколегії 16.11.2020

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ УГЛОВЫХ ВОЛНОВОДОВ S-ДИАПАЗОНА

П. Р. Тришин, Н. В. Гончар, К. А. Терещенко

Финишная обработка волноводов (притупление острых кромок, удаление заусенцев, полирование мест сварки или пайки канала и фланцев) проводится с целью устранения всех дефектов поверхности, которые образовались на предыдущих операциях, и придания им необходимой шероховатости, которая влияет на величину активных потерь энергии. В большинстве случаев прямоугольных волноводов сложной пространственной формы с угловыми сварными переходами, финишная обработка канала выполняется вручную или средствами малой механизации. Альтернативой для обработки каналов волноводов являются: анодно-абразивное вибрационное хонингование, абразивно-экструзивная обработка, обработка на специальных притирочных станках, гидроабразивное прокачивание. Однако, эти методы отличаются низкой производительностью, требуют сложного оборудования, мойку обработанных поверхностей, и применяются только к прямым волноводам или тем, которые имеют плавный изгиб. Предварительные исследования полирования канала волноводов ёршиковой полимерно-абразивной щеткой показали хорошие результаты по шероховатости, производительности и результирующим электропараметрам. Для автоматизации

финишной обработки волноводов, имеющих прямолинейную форму или один простой прямоугольный изгиб, было предложено выполнять ее на горизонтально-фрезерном станке с ЧПУ. Для обработки волноводов последовательно применяли два типа полимерно-абразивных щеток фирмы «Osborn»: ёршиковую и концевую. Обработка предусматривала полирование канала в местах сварных швов и фланца, удаление заусенцев непосредственно после механической обработки на том же станке, на котором выполнялось фрезерование фланцев. Так же для механизации финишной обработки волноводов сложной конструкции (более одного сгиба) предложено заменить операцию последовательного ручного полирования с помощью средств малой механизации на полирование на специальной установке. Траектория движения инструмента обеспечивалась копиром. Данная установка также обеспечивает заданный натяг автоматически и имеет возможность корректировать его по мере износа инструмента. В результате усовершенствования финишной обработки полностью удалено ручное полирование волновода, геометрия и шероховатость канала значительно улучшились. Разработка специального оборудования позволила значительно (в 3...5 раз) сократить время и уменьшить человеческое влияние на точность обработки.

Ключевые слова: прямоугольный угловой волновод; финишная обработка; автоматизация; полимерно-абразивная щетка; полирование сварных швов.

AUTOMATION OF THE FINISHING RECTANGULAR ANGLED S-RANGE WAVEGUIDES

P. Tryshyn, N. Gonchar, K. Tereshchenko

Finishing of waveguides (sharp edges blunting, burrs removal, polishing of welding or soldering of the duct and flanges) is carried out in order to eliminate all surface damages that are formed from previous operations and give it the necessary roughness, which affects the amount of active power loss. In most cases of complex spatial shape rectangular waveguides with angled welded transitions, the finishing of the duct is performed manually or by means of small mechanization. An alternative to the finishing of waveguide duct is anode-abrasive vibration honing, abrasive-extrusion processing, processing on special grinding machines, hydro-abrasive pumping. These methods are low productivity, require complex equipment, washing treated surfaces, and are applied only to straight waveguides or those that have a smooth flexion. Preliminary researches of polishing the waveguide duct with a polymer-abrasive brush have shown good results in terms of roughness, performance and electrical parameters. To automate finishing of the waveguides that have simple form or one simple rectangular flexion, it was proposed to perform it on a horizontal CNC milling machine. For processing of waveguides two types of polymer-abrasive brushes of Osborne firm were consistently applied: internal and end brushes. Processing involved polishing duct in welding seam spots and a flange, burrs removal immediately after processing on the same machine on which milling of flanges of waveguides was carried out. Also for mechanization of finishing the complex designed waveguides (more than one flexion) it is offered to replace operation of consecutive manual polishing by small mechanization of polishing on special equipment. The trajectory of the tool was provided by a copier. This device also provides the preset tightness automatically and ability to adjust it as the tool wears out. As a result of the improvement in finishing, the manual polishing of the waveguide was completely removed, and the geometry and roughness of the duct were significantly improved. The development of special equipment has significantly (3...5 times) reduced time and human impact on machining accuracy.

Keywords: rectangular angled waveguide; finishing; automation; polymer-abrasive brush; polishing the welding spots.

Тришин Павло Романович – аспірант кафедри «Технології машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Гончар Наталя Вікторівна – канд. техн. наук, доцент кафедри «Технології машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Терещенко Кирило Олександрович – студент кафедри «Технології машинобудування», Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Pavlo Tryshyn – PhD student of Department «Technologies of mechanical engineering», National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: trishin87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3301-5124.

Natalia Honchar – PhD, Associate Professor of Department «Technologies of mechanical engineering», National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: gonchar@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6040-0394.

Kirilo Tereshchenko – student of Department «Technologies of mechanical engineering», National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: ktereschenko70@gmail.com.