

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.285-293>

А. О. Сергєєв, асп., В. М. Боков, проф., канд. техн. наук, В. М. Шмельов, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com

## Удосконалення електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата з ручною подачею електрода-інструмента

Запропоновано самогальмувальну передачу в якості механізму керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата. Показано, що використання такої електроерозійної головки дозволяє покращити її експлуатаційні характеристики за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

**електроерозійна головка, розмірна обробка дугою, настільний свердлувальний верстат, вал-шестерня рейкової передачі, черв'ячна передача**

**Постановка проблеми.** В теперішній час в машинобудуванні номенклатура оброблюваних матеріалів та форма оброблюваних виробів стимулюють застосування різних видів електричної обробки металів. Найбільш поширений з них є електроімпульсна обробка. Вона сьогодні досягла досконалості, та дозволяє обробляти отвори і порожнини з точністю до 0,01 мм при використанні графітових електродів-інструментів, та забезпечує їх наднизький електроерозійний нанознос [1]. Так, електроерозійні верстати фірми Sodick мають лінійні сервоприводи, що здатні коректувати положення електрода-інструмента (зокрема торцевий міжелектродний зазор) 500 разів в секунду. Саме тому вартість такого верстата оцінюється сотнями тисяч доларів. Крім того, даний спосіб обробки використовує в якості енергоносія електричну іскру або електричний імпульс, які горять в торцевому міжелектродному зазорі з паузами. При паузі деталь не обробляється, тому електроімпульсний спосіб обробки не забезпечує максимально можливу продуктивність обробки.

В той же час, для умов ремонтних заводів та майстерень не потрібна висока точність обробки, а потрібне більш дешеве обладнання та велика продуктивність обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За роботами [2, с. 1-2; 3, с. 4-5; 4, с. 3; 5, с. 3-4; 6, с. 7; 7] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД). При реалізації даного способу електрична дуга безперервно (без технологічних пауз) горить між електродом-інструментом та електродом-заготовкою в поперечному потоці робочої рідини. Потік стискує електричну дугу як в енергетичному, так і в геометричному плані та забезпечує надійне вилучення продуктів ерозії із зони обробки. Продуктивність способу РОД приблизно на порядок перевищує

продуктивність електроімпульсної обробки. Значне підвищення продуктивності пояснюється не тільки відсутністю пауз при обробки, але і тим, що з'явилася можливість простими засобами (за допомогою зварювальних випрямлячів) вводити в зону обробки великі потужності постійного технологічного струму.

За роботою [8, с. 55] відомий типовий електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга 8м», що реалізує процес РОД, який включає в себе, власне, верстат у складеному стані, гідростанцію, масло збірник, пульт керування, джерело живлення технологічним струмом, електрошафу, шафу інструментальну і дві підставки, та займає достатньо велику площу (16 м<sup>2</sup>). Він постачається електрогідравлічним приводом автоматичного слідкування за торцевим міжелектродним зазором. Даний верстат задовольняє умові щодо створення для ремонтних заводів та майстерень електроерозійного верстата великої продуктивності обробки, але не задовольняє умові щодо його малої вартості.

Відома електроерозійна головка розмірної обробки дугою [8, с. 187], що створена на базі настільного верстата (рис. 1). Вона має ручну осьову подачу електрода-інструмента від вал-шестерні, що приводиться в дію штурвалом. Вал-шестерня є частиною рейкової передачі, а рейкою служить шпindelна втулка. Наявність ручної подачі суттєво спрощує установку: відпадає потреба в станції гідроприводу, в слідкуючому гідроциліндрі, спрощується пульт керування тощо. Електроерозійна головка на базі настільного свердлувального верстата проста у виготовленні, займає невелику площу (до 6 м<sup>2</sup>), не потребує модернізації базового верстата, а отже, витрати додаткових коштів, мало коштовна, а тому може застосовуватися на ремонтних заводах та в майстернях

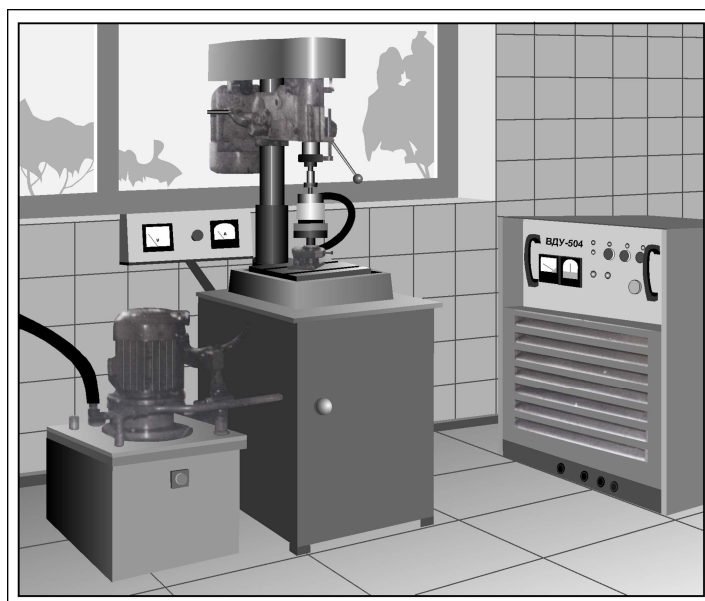


Рисунок 1 – Електроерозійна прошивна головка, що створена на базі настільного свердлувального верстата

*Джерело: розробка автора Бокова В. М.*

Однак при експлуатації відомої електроерозійної головки оператор відчуває на рукоятці штурвала, яким здійснює подачу електрода-інструмента, велике зусилля. Причому, чим більше різниця між зовнішнім діаметром електродотримача та діаметром отвору, що прошивається, тим більше зусилля, яке потрібно переборювати оператору. Саме тому, коли різниця діаметрів досягає певного рівня, подальше утримання

електрода-інструмента стає неможливим. Процес обробки припиняється. Це призводить до суттєвого звуження експлуатаційних характеристик головки. Крім того, при частих штучних коротких замиканнях, що пов'язані з точністю подачі, якість обробки погіршується. Саме тому застосування головки на ремонтних заводах та майстернях обмежено.

Максимальне зусилля  $G_{max}$  (рис. 2), що діє на шпindelну втулку 1 з боку герметичної камери, визначається за формулою (1):

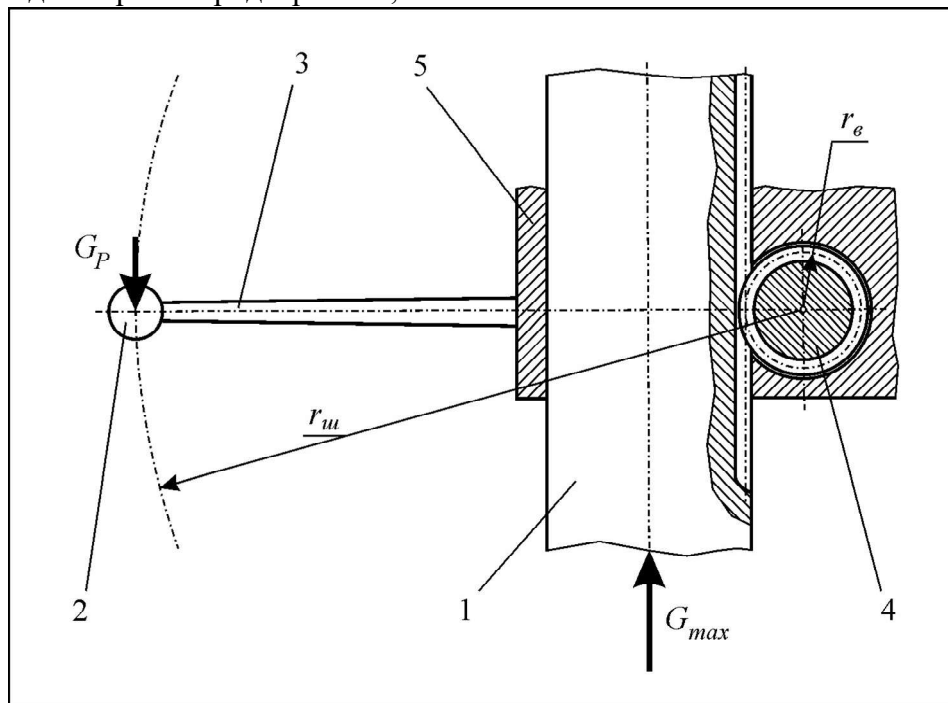
$$G_{max} = F_e \cdot P_{cm}, \quad (1)$$

де  $F_e$  – площа електродотримача 11 (рис. 3), що сприймає тиск робочої рідини, мм<sup>2</sup>

$$F_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad (2)$$

$P_{cm}$  – статичний тиск робочої рідини в герметичній камері, МПа;

$D$  – діаметр електродотримача, мм.



1 – шпindelна втулка; 2 – рукоятка; 3 – штурвал; 4 – вал-шестерня; 5 – корпус

Рисунок 2 – Схема дії сил в зоні керування осью подачею електрода-інструмента на електроерозійній прошивній головці, що створена на базі настільного свердлувального верстата

Джерело: розробка авторів

Для зручності роботи, зусилля  $G_p$  (рис. 2) на рукоятці 2 штурвала 3, що сприймає оператор, звичайно, не повинно перевищувати 50 Н. Воно визначається за формулою (3):

$$G_p = \kappa \cdot G_{max}, \quad (3)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт, що ураховує зменшення зусилля за рахунок різниці між радіусами вал-шестерні та штурвала  $r_{ui}$  (4):

$$\kappa = \frac{r_e}{r_{ш}}. \quad (4)$$

Якщо прийняти реальні значення для  $G_p = 50$  Н та для  $\kappa = \frac{25}{500} = 0,05$ , то за формулою (3) визначимо максимальне зусилля  $G_{max}$ , що повинно діяти на шпindelьну втулку 1:

$$G_{max} = \frac{G_p}{\kappa} = \frac{50}{0,05} = 1000 \text{ Н}. \quad (5)$$

Із виразу (1) для цих умов визначаємо максимально допустимий статичний тиск робочої рідини в герметичній камері:

$$P_{ст} = \frac{G_{max}}{F_e} = \frac{1000}{5024} = 0,19 \text{ МПа}, \quad (6)$$

$$\text{де } F_e = \frac{3,14 \cdot 80^2}{4} = 5024 \text{ мм}^2. \quad (7)$$

При такому низькому тиску (6), як відомо [3], процес РОД не відбувається: спостерігається плавлення металу. Це негативно впливає на якість обробки, а саме, шорсткість обробленої поверхні – поза класу. Для підвищення якості обробленої поверхні, звичайно, електричну дугу більш інтенсивно стискають динамічним потоком робочої рідини. З цією метою статичний тиск рідини підвищують до рівня 0,3 – 1,5 МПа. Але для даних умов це неможливо, бо зусилля на рукоятці значно зростає, а підвищення радіусу штурвала  $r_{ш}$  приводить до погіршення зручності керування. Крім того, оператор повинен весь час тримати рукоятку штурвала, поки в камері є тиск, що теж є незручністю.

**Постановка завдання.** Із викладеного вище виходить, що для умов ремонтних заводів та майстерень доцільно покращити експлуатаційні характеристики електроерозійної головки на базі настільного свердлувального верстата за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

В зв'язку з цим, певний практичний інтерес представляє можливість застосування для розвантаження оператора самогальмувальної передачі. Така можливість не була об'єктом дослідження.

Метою дослідження є покращання експлуатаційних характеристик головки та підвищення якісних показників обробки в результаті застосування самогальмувальної передачі.

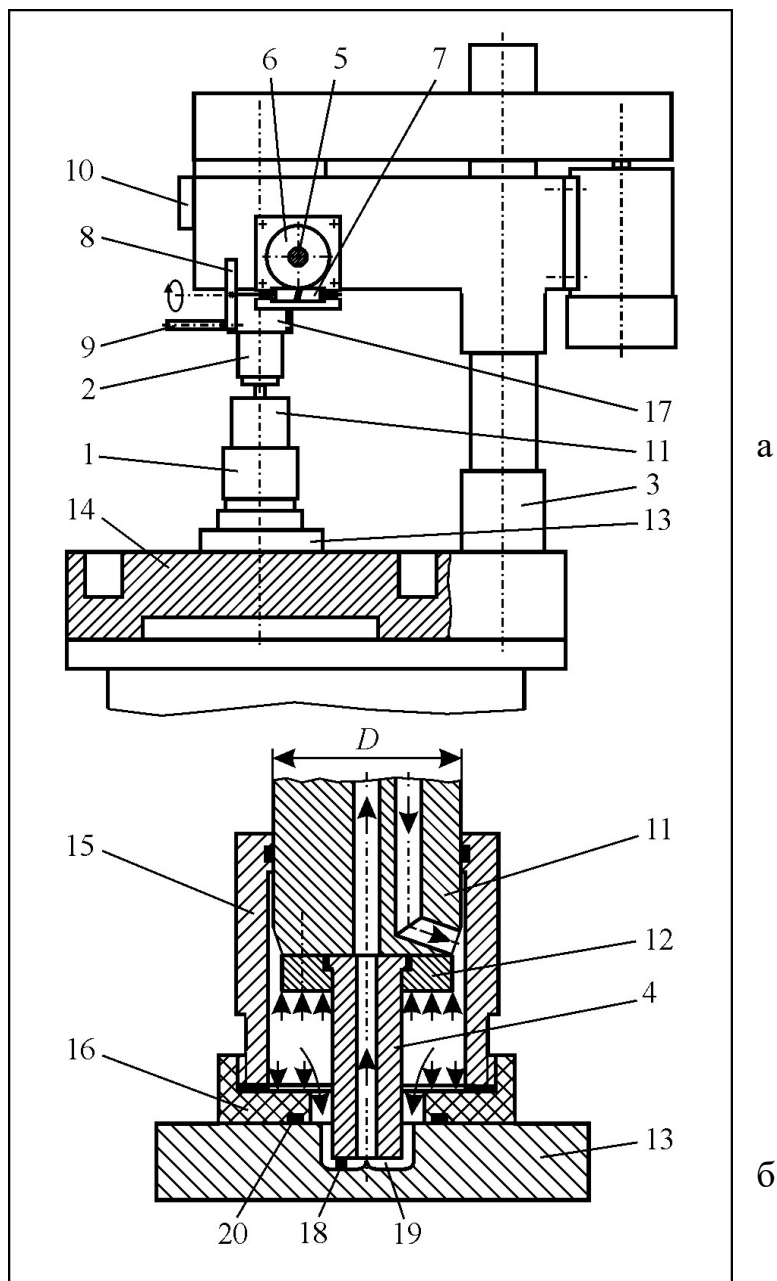
Для досягнення поставленої мети необхідно запропонувати для оператора розвантажувальний механізм керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата та навести опис його роботи.

**Виклад основного матеріалу.** Для розвантаження оператора від осьового зусилля робочої рідини в герметичній камері головки, що передається на шпindelьну втулку, доцільно використати конструктивні можливості настільного свердлувального верстата. Верстат, як показано вище, має вал-шестерню, що приводиться в дію штурвалом.

Саме тому, задача щодо розвантаження вирішується у відомій електроерозійній головці розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата з ручною подачею електрода-інструмента від вал-шестерні за рахунок того, що на місце штурвала приводу вал-шестерні встановлено самогальмувальну передачу, наприклад

однозахідну черв'ячну, з маховичком та рукояткою, а головка постачається амперметром, що вимірює силу струму в процесі обробки, причому амперметр розташований в полі зору оператора.

Пояснення щодо роботи запропонованого механізму керування ручною подачею електрода-інструмента наводиться на рис. 3.



- 1 – електроерозійна головка; 2 – шпindelь; 3 – настільний свердлувальний верстат; 4 – електрод-інструмент; 5 – вал-шестерня; 6 – черв'ячне колесо; 7 – черв'як; 8 – маховичок; 9 – рукоятка; 10 – амперметр; 11 – електродотримач; 12 – тримач; 13 – електрод-заготовка; 14 – робоча плита; 15 – герметична камера; 16 – електроізолятор; 17 – шпindelьна втулка; 18 – електрична дуга; 19 – міжелектродний зазор; 20 – ущільнювальне кільце

Рисунок 3 – Схема електроерозійної головки розмірної обробки дугою, що пропонується:  
а – загальний вид; б – перетин робочої зони

Джерело: розробка авторів

Електроерозійна головка 1 змонтована на шпинделі 2 настільного свердлувального верстата 3 з ручною осьюовою подачею електрода-інструмента 4 від вал-шестерні 5, з якої попередньо було знято штурвал її приводу (на кресленні не показано). На місце штурвала в кінематичному зв'язку з вал-шестернею 5 встановлено самогальмувальну передачу, наприклад однозахідну черв'ячну (черв'ячне колесо 6, черв'як 7), з маховичком 8 та рукояткою 9. Головка 1 постачається амперметром 10, що вимірює силу технологічного струму в процесі обробки, причому амперметр 10 розташований в полі зору оператора.

Для реалізації процесу прошивання отвору електрод-інструмент 4 закріплюють на електродотримачі 11 за допомогою тримача 12. Електрод-заготовку 13 кладуть на робочу плиту 14 верстата 3, підводять її під електрод-інструмент 4 та позиціонують відносно нього. Електрод-заготовку 13 закріплюють відносно плити 14 (на кресленні кріплення не показано). Шпиндель 2 разом з електродотримачем 11 та електродом-інструментом 4 піднімають вгору і на електродотримач 11 одягають герметичну камеру 15 разом з електроізолятором 16. Далі шпиндель 2 опускають так, щоб камеру 15 можна було б руками перемістити вниз до контакту електроізолятора 16, а між електродом-інструментом 4 та електродом-заготовкою 13 був гарантований зазор декілька міліметрів. Головка 1 підготовлена до роботи.

Для прошивання отвору вмикають електродвигун насосу подачі робочої рідини в герметичну камеру 15 (на кресленні не показано) та джерело живлення постійним технологічним струмом (звичайно зварювальний випрямляч; на кресленні не показано). Обертаючи маховичок 8 рукояткою 9, передають обертальний рух черв'яку 7, а черв'як – черв'ячному колесу 6, яке передає орбітальний рух вал-шестерні 5, яка пов'язана з шпиндельною втулкою 17 рейковою передачею (на кресленні не показано). Шпиндельна втулка 17 отримує осьовий рух та опускається, а з нею електродотримач 11 з електродом-інструментом 4. Підходячи до електрода-заготовки 13 на певну відстань (звичайно соті долі міліметра), між електродом-інструментом 4 та електродом-заготовкою 13 збуджується електрична дуга 18, яка горить в торцевому міжелектродному зазорі 19 в потужному гідродинамічному тиску робочої рідини та здійснює обробку отвору. Усталеність обробки контролюється амперметром 10: при великому торцевому міжелектродному зазорі 19 сила струму дорівнює нулю і обробка припиняється (команда на подальше зближення електродів 4, 13); при надто малому між-електродному зазорі 19 сила струму відповідає короткому замиканню (команда на подальше розведення електродів 4, 13). Статичний технологічний тиск рідини в камері 15 може досягати 1,5 МПа. Даний тиск діє в камері як на електроізолятор 16 (дивись стрілки вниз), так і на рухомий електродотримач 11 (дивись стрілки вгору). Тиск, що діє вниз є корисним, тому що він гарантує стиснення ущільнювального кільця 20, а отже герметизує нижню частину камері 15. Тиск, що діє вгору, передається механізму ручної подачі електрода-інструмента. Дане технічне рішення передбачає сприймання зусилля від даного тиску не руками, а самогальмувальною передачею, зокрема однозахідною черв'ячною (дивись черв'ячне колесо 6, черв'як 7). Крім того, самогальмувальна передача забезпечує значно більшу точність подачі електрода-інструмента 4. При цьому кількість випадкових коротких замикань значно зменшується, а якість обробки підвищується.

Слід відмітити, що однозахідна черв'ячна передача, колесо 6 якої з'єднано з вал-шестернею 5, а черв'як 7 з маховичком 8, який має рукоятку 9, утворюють редуктор із сумарним передатним числом  $i_{\text{сум}}$ , що визначається за формулою (8):

$$i_{\text{сум}} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3, \quad (8)$$

де  $i_1$  – передатне число між вал-шестернею 5 ( $z_1 = 18$ ) та черв'ячним колесом 6 ( $z_2 = 30$ );  $i_2$  – передатне число між черв'яком 7 ( $z_3 = 1$ ) та черв'ячним колесом 6 ( $z_2 = 30$ );  $i_3$  – передатне число між черв'яком 7 ( $r_4 = 10$ ) та маховичком 8 ( $r_p = 50$ ).

Для реальних значінь параметрів, що вказані у дужках,  $i_{\text{сум}} = 255$ .

Максимальне зусилля  $G_{\text{max}}$ , що діє на шпindelьну втулку 17 з боку герметичної камери при максимально допустимого статичному тиску  $P_{\text{cm}} = 1,5$  МПа, визначається за формулою (1):

$$G_{\text{max}} = F_e \cdot P_{\text{cm}} = 5024 \cdot 1,5 = 7536 \text{ Н.}$$

Тоді, зусилля на рукоятці маховичка  $G_p$ , що сприймає оператор, визначиться за формулою (9):

$$G_p = \frac{G_{\text{max}}}{i_{\text{сум}}} = \frac{7536}{255} = 29,5 \text{ Н.} \quad (9)$$

Як бачимо, зусилля оператора на рукоятці маховичка в даному механізмі при максимально допустимому статичному тиску значно менше допустимого зусилля, яке складає 50 Н. Це дозволяє суттєво покращати якість обробки, так як якість залежить від тиску. Крім того, в даному самогальмувальному механізмі оператор не повинен весь час тримати рукоятку маховичка, поки в камері є тиск, що підвищує зручність керування.

**Висновки.** Запропоновано самогальмувальну передачу в якості механізму керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата. Показано, що використання такої електроерозійної головки дозволяє покращати її експлуатаційні характеристики за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

## Список літератури

1. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов . Харьков: ПРАТ «Полиграфсервис», 2013. 104 с.
2. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Київ : НТУУ «КПІ», 1999. 36 с.
3. Боков В.М. Розмірне формування поверхонь електричною дугою : монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002 . 300 с.
4. Боков В.М., Попова М. І. Обробка отворів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2014 . 160 с.
5. Боков В.М., Сіса О.Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013 . 172 с.
6. Боков В.М. Фізичні процеси спецтехнологій. Експериментальні дослідження. Збірник статей. Кропивницький: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2022. 625 с.
7. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. праць КНТУ. 2017. Вип 30. С.103-110.
8. Боков В.М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстата . Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2020. 316 с.

## References

1. Stavickij, B.I. (2013). *Iz istorii jelektroiskrovoj obrabotki materialov [From the history of electrosark processing of materials.]*. Har'kov: PRAT «Poligrafservis» [in Russian].
2. Nosulenko, V.I. (1999). Rozmirna obrobka metaliv elektrychnoiu duhoiu [Dimensional processing of metals with an electric arc]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kyiv : NTUU «KPI» [in Ukrainian].
3. Bokov, V.M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon elektrychnoiu duhoiu [Dimensional shaping of surfaces by an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
4. Bokov, V.M., Popova, M.I. (2014). *Obrobka otvoriv elektrychnoiu duhoiu [Treatment of holes with electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
5. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obrobliuvanist materialiv elektrychnoiu duhoiu [Processing of materials with an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
6. Bokov, V.M. (2022). *Fizychni protsesy spetstekhnolohii. Eksperymentalni doslidzhennia. Zbirnyk statei [Physical processes of special technologies. Experimental studies. A collection of articles]*. Kropyvnytskyi: Polihrafichno-vydavnychi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
7. Nosulenko, V.I., & Shmelov, V.M. (2017). Osoblyvosti elektrychnoi duhy v poperechnomu pototsi ridyny [Features of the electric arc in the transverse flow of liquid.]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia : zb. nauk. prats KNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation : Collected Works of KNTU, Issue 30,103-110* [in Ukrainian].
8. Bokov, V.M. (2020). *Tekhnolohiia rozmirnoi obrobky duhoiu. Istorychnyi narys, verstaty [Technology of dimensional processing with an arc. Historical essay, machines.]*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].

**Anton Sergeev**, graduate student, **Viktor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Vitaly Shmelov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University*

### **Improvement of the EDM Head for Dimensional Processing With an Arc on the Basis of a Desktop Drilling Machine With Manual Feeding of the Electrode-Tool**

Currently, in mechanical engineering, the nomenclature of processed materials and the shape of processed products stimulate the use of various types of electrical processing of metals. The most common of them is electropulse treatment. The cost of a modern electric pulse machine is estimated at hundreds of thousands of dollars. In addition, this method of processing uses as an energy carrier an electric spark or an electric pulse that burns in the end interelectrode gap with pauses. During a pause, the part is not processed, therefore, the electropulse method of processing does not provide the maximum possible processing productivity. At the same time, the conditions of repair factories and workshops do not require high processing precision, but require cheaper equipment and high processing performance. A highly productive method of dimensional processing of metals with an electric arc is known.

A well-known electroerosion head for dimensional treatment with an arc, created on the basis of a desktop machine. It has a manual axial feed of the electrode-tool from a gear shaft driven by a steering wheel, easy to manufacture, occupies a small area, does not require the modernization of the basic machine, and therefore does not require additional funds, is not expensive, and therefore can be used in repair factories and in workshops. However, when operating a known EDM head, the operator feels a great force on the handle of the steering wheel, which feeds the electrode-instrument. Moreover, the greater the difference between the outer diameter of the electrode holder and the diameter of the hole being stitched, the greater the effort the operator must overcome. This leads to a significant narrowing of the operational characteristics of the head. In addition, with frequent artificial short circuits related to the accuracy of the feed, the quality of processing deteriorates. That is why the use of the head in repair factories and workshops is limited.

The purpose of the research is to improve the operational characteristics of the head and increase the quality indicators of processing due to the use of a self-braking transmission.

The task of unloading is solved in the well-known electroerosion head of dimensional treatment with an arc on the basis of a table-top drilling machine with manual feeding of the electrode-tool due to the fact that a self-braking transmission, for example, a one-way worm, with a flywheel and a handle, is installed in place of the steering wheel of the gear shaft drive, and the head is supplied with an ammeter that measures the current strength during processing, and the ammeter is located in the field of view of the operator.



A self-braking transmission is proposed as a control mechanism for the manual feeding of the electrode-tool for the EDM head of dimensional treatment with an arc based on a desktop drilling machine. It is shown that the use of such an EDM head allows to improve its operational characteristics by relieving the operator from axial forces during control and to increase the quality indicators of processing by reducing the number of short circuits and increasing control accuracy.

**EDM head, dimensional arc machining, table drilling machine, rack gear shaft, worm gear**

*Одержано (Received) 12.11.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023*