

## ПРОБЛЕМИ ЗНОСУ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ

Павлов Олександр Григорович

старший викладач

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0001-7421-8502

e-mail: pvalex@ukr.net

*В статті продемонстровані результати дослідження впливу технологічних параметрів процесу електроерозійної обробки металевих виробів. Виявлені та систематизовані основні фактори, які впливають на знос електроду-інструменту при електроерозійній обробці.*

**Ключові слова:** електроерозійна обробка, електрод-інструмент, ерозійна стійкість.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.3.5>

### **Вступ і постановка проблеми.**

При електроерозійній обробці (ЕЕО) важливими параметрами є швидкість знімання металу, величина шорсткості поверхні та стійкість електрода-інструмента (ЕІ). Якщо при прошивці в заготовках наскрізних циліндричних порожнин знос ЕІ в ряді випадків можливо компенсувати збільшенням його довжини (хоча і в цьому випадку знос ЕІ небажаний), то при виготовленні об'ємних деталей знос навіть 0,1% може виявитися неприпустимим внаслідок високих вимог до точності виготовлення профілю деталі. Більше того, є ряд конструктивних елементів деталей, виконання яких методом електроерозійної обробки (ЕЕО) при наявності зносу ЕІ неможливо, навіть задалегідь корегуючи його профіль. До таких елементів відносяться гострі кромки, тонкі перемички та ін. В цьому випадку необхідно використовувати кілька електродів, виготовлення яких у випадку високої точності або складної форми є досить трудомістким процесом.

Проведення ЕЕО без зносу електрода-інструмента дозволила б знизити вартість операції формоутворення профілю, так як при цьому витрати на виготовлення електрода розподіляються на ту кількість деталей, яку їм можна обробити. Крім того, в цьому випадку можливе використання одного ЕІ для чорнкової і чистової обробки при наданні йому орбітального руху. Це також дозволяє знизити вартість виконання операції електроерозійного формоутворення деталі за рахунок зменшення кількості використовуваних електродів і зниження часу обробки.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

З огляду на важливість проблеми, дослідники і розробники обладнання для ЕЕО значну увагу приділяють виявленню та вивченню різних факторів, що впливають на стійкість ЕІ. Вже на перших етапах дослідження процесу електричної ерозії в рідкому середовищі було встановлено істотний вплив властивостей матеріалу ЕІ і заготовки на характеристики обробки і стійкість ЕІ. Були прийняті спроби розробки критеріїв, що характеризують ерозійну стійкість матеріалу [1] через їх теплофізичні та електричні характеристики. Значна кількість досліджень присвячена як теоретичному, так і експериментальному дослідженню впливу властивостей матеріалів на характеристики оброблюваності [2]. Однак в процесі накопичення знань про закономірності ЕЕО було виявлено, що в залежності від характеристик імпульсів (полярності, тривалості, амплітуди струму і напруги, форми та ін.) показники оброблюваності матеріалів суттєво змінюються. Причому ма-

теріали, найбільш ерозійно стійкі на одних режимах, проявляють низьку стійкість на інших. Це виявлено і при вивченні взаємної оброблюваності інструментальних сталей і використанні інших матеріалів.

Розрахунки, виконані при вирішенні теплової задачі [3], а також експериментальні дані виявили, що при коротких імпульсах з великою амплітудою струму відмінності в ерозійній стійкості у міді, сталі, графіту і вольфраму не перевищують 1,2-2,5 раз, причому мідь менш ерозійно стійка, ніж сталь. Зі зменшенням амплітуди і збільшенням тривалості імпульсу струму відмінності в величинах ерозійної стійкості у зазначених матеріалів істотно зростають, досягаючи 10-15 разів, причому стійкість міді більше, ніж у сталі.

На основі наведених даних в [4] дається обґрунтований висновок, що внаслідок сильної залежності ерозійної стійкості матеріалів від параметрів імпульсів неможлива побудова одного ряду ерозійної стійкості різних матеріалів. У зв'язку з цим аналіз якості спеціальних електродних матеріалів для ЕЕО суттєво ускладнюється, а розробка єдиної методики визначення показників якості таких матеріалів стає досить проблематичною.

**Метою** роботи є виявлення та систематизація основних факторів, які впливають на знос електроду-інструменту в процесі ЕЕО.

### **Виклад основного матеріалу.**

У більшості випадків для виготовлення ЕІ використовують матеріали на основі міді і графіту за допомогою яких на деяких режимах досягається незначний знос при обробці конструкційних і вуглецевих сталей. Однак в разі необхідності обробки жаростійких сталей, твердих сплавів величина зносу і цих електродних матеріалів істотно зростає. Більш ерозійно стійкими є композиційні матеріали на основі міді з додаванням тугоплавких добавок - нітриду бору, окису хрому та ін.

Дослідження значної кількості електродних матеріалів підтвердило, що їх ерозійна стійкість залежить від характеристик імпульсних розрядів. Крім того, на величину зносу електрода суттєво впливають не тільки теплофізичні властивості матеріалу, а й його структурні характеристики - пористість, розміри зерна і т.д. Встановлено, що максимум зносу композиційних електродних матеріалів при різних режимах обробки має місце в разі збігу діаметра каналу розряду і середніх розмірів зерна. Для зниження зносу середній розмір зерна повинен бути менше в 5-15 разів, а середній розмір пор в 100-700 разів менше діаметра каналу розряду. Зниження зносу на кромках ЕІ і підвищення продуктивності процесу

ЕЕО при використанні в якості ЕІ пористих матеріалів обумовлено дією газодинамічних факелів, що утворюються в результаті випаровування і піролізу робочої рідини в порах і дисоціації ерозійно-зміцнювальної компоненти композиційних електродних матеріалів [5].

Незважаючи на те, що ряд нових матеріалів ЕІ забезпечують обробку з досить гарними технологічними результатами за величиною зносу і швидкості знімання, слід враховувати й інші сторони їх використання. Зокрема, деякі з них (вольфрам та ін.) досить важко піддаються механічній обробці і тому виготовлення з них електродів є складною технологічною задачею. Для отримання інших потрібне спеціальне обладнання (наприклад, для порошкової металургії) і ряд дорожчих компонентів, що підвищує вартість електродів. Крім того, в ряді технологічних процесів доводиться використовувати не спеціальні електродні матеріали, а нетрадиційні електропровідні матеріали, наприклад, сталь для обробки сталевих виробів. У зв'язку з цим для ЕЕО вельми важливим являється зв'язок характеристик матеріалів і електричних параметрів розряду з особливостями зносу ЕІ.

Існує ряд трактувань фізичного механізму зносу ЕІ і відповідно шляхів його зниження. Відповідно однією з гіпотез, які отримали досить широке поширення, різке зниження зносу при деяких режимах обробки пояснюється захисними властивостями вуглеграфітових плівок, що утворюються на електроді при піролізі вуглецевмісних робочих рідин під час дії розряду. Вуглецева плівка, за даними авторів цієї гіпотези, надає теплзахисну дію на поверхневі шари ЕІ завдяки високій температурі плавлення графіту, що становить 3500-3600 °С [6]. Вважається, що на початковій стадії імпульсу, коли щільність струму в каналі розряду велика, відбувається руйнування плівки, а при зменшенні щільності до кінця розряду - її інтенсивне осадження. При цьому можна підібрати такі характеристики імпульсу струму по амплітуді і тривалості, при яких має місце динамічна рівновага між утворенням графітової плівки і її руйнуванням. Захисна плівка відповідно до [7] складається не тільки з пірографіта, але і з матеріалу заготовки. Відповідно до цієї гіпотези для зменшення зносу ЕІ рекомендується витримувати відношення між амплітудою імпульсу струму і його тривалістю в межах 0,03-0,07 А/мкс. З метою зниження зносу запропоновано використовувати імпульси гребінчастої форми. У цьому випадку під час дії піків гребінчастого імпульсу відбувається знімання металу з деталі і руйнування плівки на електроді, а під час западин – плівкоутворення [8]. При цьому канал розряду встигає зміститися і під час наступного піку він знаходиться вже в іншому місці. Встановлюючи певне співвідношення між амплітудою гребнів гребінчастого імпульсу, величиною струму в западині і тривалістю гребнів і западини, можна отримати невелику величину зносу. Експерименти показують, що знос ЕІ при використанні гребінчастих імпульсів знижується при збільшенні кількості гребнів, тобто при збільшенні тривалості імпульсу.

Потрібно відзначити, що це явище зниження зносу електрода при зміні тривалості імпульсу було встановлено в багатьох дослідженнях, виконаних на самому різному обладнанні і в широкому діапазоні параметрів імпульсів. Більш того, зниження величини зносу при збільшенні тривалості імпульсу було отримано і при використанні в якості робочої рідини води. В цьому випадку відсутня можливість виділення вуглецю при її розкладанні. Це дозволяє припустити, що зме-

шення зносу при збільшенні тривалості імпульсу обумовлено не тільки утворенням захисних плівок, а й іншими факторами: перерозподілом енергії між анодом і катодом, зміною щільності струму в процесі розряду і т.д.

Тривалість імпульсу не є єдиною характеристикою, що визначає величину зносу ЕІ. Дослідження показують, що на ефективність видалення матеріалу з лунки на деталі і знос ЕІ впливають і інші параметри імпульсу. В експериментах [1,2,6] визначалися швидкості знімання речовини з анода і катода в разі використання суперпозиції імпульсів: на імпульс з тривалістю  $t_1$  і амплітудою  $i_1$  накладався коротший імпульс з тривалістю  $t_2$  і амплітудою  $i_2$ , більшою, ніж  $t_1$ . Початок короткого імпульсу міг зміщуватися відносно початку довгого імпульсу на час  $t_{зм}$ . У результаті експериментів виявлено, що залежності величини швидкості знімання і величини відносного зносу від часу зсуву мають екстремуми. В порівнянні з прямокутним імпульсом еквівалентної енергії при використанні імпульсів ступінчастою форми істотно змінюється кількість металу, що викидається з анода і катода. Якщо протягом імпульсу струм зростає поступово, то знос ЕІ знижується. Якщо ж струм знижується до кінця імпульсу, то має місце різке зростання зносу. Зниження зносу ЕІ при використанні імпульсів з малою величиною струму на початку імпульсу пов'язують з особливостями розподілу і відведення тепла на електродах, яке виділяється при розряді.

Фізичні процеси, що відбуваються при розряді, в значній мірі залежать від складу робочої рідини. Дослідження [9] показали, що введення робочої рідини призводить до зміни розподілу виділеної при розряді енергії між анодом і катодом. Відповідно до гіпотези авторів це відбувається за рахунок утворення на металевих поверхнях міцних адсорбційних плівок, що тягне за собою зміну властивостей рідини по довжині міжелектродного проміжку (МЄП).

При ЕЕО в воді та електролітах також має місце ефект перерозподілу енергії розряду між електродами при зміні складу електроліту і, як наслідок, ерозія анода збільшується. В даний час провідні фірми з випуску електроерозійного обладнання проводять дослідження в напрямку пошуку складів робочих рідин, що забезпечують підвищення продуктивності ЕЕО і зниження зносу ЕІ. У рідини вводять і порошки, що утворюють під дією електричного розряду негативні іони (з оксидів міді, алюмінію, нікелю та ін.) І добавки з біфенільних радикалів, що знижують в'язкість, а також добавки, що змінюють електропровідність. Однак аналіз цих робіт показує, що остаточної ясності про характер впливу складу робочої рідини на знос електродів немає.

На величину відносного зносу електрода впливають не тільки форма імпульсів, які видаються генератором, і склад робочого середовища, а й ряд інших факторів. Процес ЕЕО є імовірнісним, при якому умови проходження розрядів безперервно випадковим чином змінюються. Тому, якщо генератор імпульсів видає в розрядний контур імпульси напруги певної форми, наприклад прямокутної, то і при нормальному перебігу процесу завжди присутні імпульси з різною формою розрядного струму: короткі замикання, дугові, робочі з різним часом затримки розряду після прикладення напруги, що призводять до різного впливу на електроди і відповідно викликають неоднаковий знос. Тобто що має місце кореляція між часом затримки імпульсів і зносом електродів. Зокрема, збільшення числа імпульсів з малим часом затримки підви-

щує відносний знос. Тому в деяких систем управління приводом регулятора подачі ця характеристика вибирається в якості керуючого сигналу. Тобто система автоматичного регулювання непрямим чином впливає на величину зносу. Необхідно вказати і на те, що в дослідженнях процесу ЕЕО, в якому виключалися імпульси з малим часом затримки, не було встановлено зниження зносу ЕІ.

На величину відносного зносу впливають і інші фактори, що визначають умови протікання процесу. Зв'язок площі обробки з величиною відносного зносу ЕІ обумовлена концентрацією в МЕР просторі продуктів ерозії і газопарових бульбашок, а також тепловим станом електрода [10]. Так, при зменшенні площі обробки збільшується кількість газопарових бульбашок в МЕР, зростає тепловий потік через одиницю площі електродів і в ряді випадків відбувається зміна величини торцевого зазору. Все це призводить до зростання зносу ЕІ. Якщо ж умови обробки такі, що ускладнено видалення продуктів ерозії і знижена інтенсивність охолодження електродів, то зростає кількість розрядів, вторинно диспергуючих продуктів ерозії, і температура поверхні електродів, що також збільшує знос. Такі умови мають місце при зростанні площі обробки та збільшенні глибини виготовляється порожнини.

Сильний вплив на ЕЕО надає прокачування робочої рідини: інтенсифікується видалення продуктів ерозії і охоло-

дження поверхонь електродів. Характер впливу прокачування на знос залежить від матеріалів електродів: при використанні міді знос зростає зі збільшенням витрати, при використанні графіту знос мінімальний.

Прошивку глибоких отворів малого діаметра трубчастих капілярним електродом з прокачуванням робочої рідини виконують під тиском 7...10 МПа. При її здійсненні ЕІ робить поступальний рух подачі і додаткове обертання навколо власної осі. Така схема обробки забезпечує досить високу продуктивність прошивки отворів з подачею до 20 мм / хв. В даний час порожнисті трубки виробляються спеціально для електроерозійної прошивки отворів. Виготовляють одноканальні і багатоканальні (2, 3, 4 канали) порожнисті електроди з міді та латуні з зовнішнім  $\varnothing$  0,1...3 мм, одноканальні трубки з вольфрамо-мідного сплаву  $\varnothing$  0,15...6 мм, одноканальні трубки з твердого сплаву  $\varnothing$  0,1...3 мм..

**Висновок:** Розгляд описаних вище досліджень показує, що проблема зносу електродів-інструментів є досить багатогранною і в даний час вивчена не у всіх аспектах. Дослідження ведуться за такими основними напрямками: розробка спеціальних електродних матеріалів і робочих середовищ, визначення оптимальних характеристик імпульсів для необхідних пар матеріалів електродів і необхідної якості одержуваної поверхні, підвищення якості регулювання процесів електроерозійної обробки.

#### Список літератури

1. Jeswani M.L. Dimensional analysis of tool wear on electrical discharge machining // Wear. 1979. 55.N1. P. 153—161.
2. Pandit S. M., Rajurkar K. R., Shaw M. C. Analysis of electrodischarge machining of cemented carbides//CIRP Ann. 1981. 30.N1. P. 111—116.
3. Лившиц А. Л. Рогачев И.С., Отто М. Ш. Генераторы импульсов. М., 1959.
4. Артамонов Б.А., Волков Ю.С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Часть 2. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка Москва. ВНИИПИ. 1991. - 144 с.
5. Абляз Т.Р. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов Учеб. пособие / Т.Р. Абляз, А.М. Ханов, О.Г. Хурматуллин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 121 с.
6. Heuvelmati C. I. Summary report of the CIRP cooperative research of the spark erosion machining of cemented carbides//CIRP Ann. 1980. 29.N2. P. 541—544.
7. Erden A. Effect of material on the mechanism of electrodischarge machining//Trans, of ASME/J. Eng. Mater, and Technol. 1983. 105. N 2. P. 132—138.
8. Немилев Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. —Л.: Машиностроение. Ленинград 1989. — 164 с.
9. Саушкин Б.П. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей. – М.: Изд. Дрофа, 2002. – 656 с.
10. Елисеєв Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. – М.: Изд. МГТУ им. Н. Баумана. 2010.– 437 с.

*Pavlov A.G., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

#### **Problems of wear of electrode-tool during electro-erosion machining**

*The article contains research on the problems of wear of an electrode-tool with electric discharge machining. Important parameters are the speed of removal of metal, the surface roughness and the stability of the electrode tool. If during the breakdown in the workpieces of through-cylindrical cavities, the wear of an electrode-tool in some cases can be offset by an increase in its length (although in this case, the wear of an electrode-tool is undesirable), then in the manufacture of bulk parts, wear, even 0.1% may be inadmissible because high demands on the accuracy of the profile details. Moreover, there are a number of structural elements of the parts, the execution of which by the method of electric discharge machining in the presence of wear of the electrode-tool is impossible, even in advance adjusting its profile. These elements include sharp edges, thin jumpers, and so on. In this case, it is necessary to use several electrodes, the manufacture of which in the case of high accuracy or complex form is a rather laborious process.*

*As the research shows in the article of conducting electric discharge machining without the wear of an electrode-tool, it would be possible to reduce the cost of the formation of the profile of the profile, as at the same time the cost of manufacturing the electrode is distributed to the amount of parts that they can handle. In addition, in this case, it is possible to use one electrode-tool for roughing and finishing treatment while giving it orbital movement. It also allows reducing the cost of performing the operation of the electro-erosive form-forming part by reducing the number of used electrodes and reducing the processing time.*

*The analysis of literature and publications carried out in the article shows that the problem of wear of electrode tools is quite versatile and is currently not studied in all aspects. The research is conducted in such basic directions: development of special electrode materials and working media, determination of optimal characteristics of pulses for the necessary pairs of electrodes and the required quality of the resulting surface, improving the quality of the regulation of electroerosive processes.*

**Key words:** *electric discharge machining, electrode-tool, erosion resistance.*

Дата надходження до редакції: 14.11.2020