

Моделювання швидкості знімання матеріалу при технологічному процесі розмірної обробки дугою

В статті розглянуте питання побудови математичної моделі дугового розряду, який виникає при електроерозійній обробці струмопровідних матеріалів методом РОД і сталому положенні електрода інструмента відносно електрода заготовки.

розмірна обробка дугою, дуговий розряд, електрод інструмент, електрод заготовка, міжелектродний проміжок, математична модель

Метод розмірної обробки дугою (РОД), який розроблено в КНТУ на кафедрі “Обробка металів тиском” д.т.н. Носуленко В.І., хоч і відноситься до різновиду методів електроерозійної обробки (ЕО) струмопровідних матеріалів, але має суттєві відмінності від традиційних методів (ЕО). Це, по-перше, великі потужності ($I \sim 50 \div 1000$ А, $U \sim 20 \div 50$ В), які вводяться в міжелектродний проміжок (МП), по-друге, прокачування робочої рідини (РР) через МП під тиском ($P \sim 0.5 \div 3$ МПа). Завдяки чому технологічний процес (ТП) РОД має продуктивність на порядок більшу чим звичайні методи ЕО.

За час впровадження та експлуатації автоматизація цього методу не є достатньо дослідженою. Проблема полягає в тому, що у даному методі крім фізики дугового розряду (ДР) на властивості процесу накладаються додаткові впливи як джерела живлення (ДЖ), так і вплив приводу подачі електрода інструмента (ЕІ), який безпосередньо пов'язаний з головною відмінністю – прокачування РР під тиском у МП. Сукупність різних фізичних впливів на ТП поки ще не дозволяє повно автоматизувати ТП РОД, що дозволило б отримувати відповідну продуктивність з заданою точністю та чистотою обробки поверхні. Напрацьовані дослідження процесу РОД у більшості випадків стосуються технологічних методів отримання відповідних параметрів деталей і вимагають від оператора устаткування РОД постійного візуального контролю за ходом технологічного процесу.

З метою побудови системи автоматичного керування процесом, потрібно провести окремий аналіз фізичних процесів, які виникають під час РОД, та встановити взаємодію між ними. При цьому потрібно, побудувати математичну модель (ММ), яка б адекватно відображала суть методу РОД.

На першому етапі побудуємо ММ ДР без впливу механізму подачі ЕІ та прокачування РР у МП. Це дозволить відокремити поведінку ДР від вище вказаних впливів та у подальшому побудувати ММ окремо для кожного з них, що дозволить синтезувати загальну ММ ТП РОД.

До складу об'єкта дослідження при РОД входить ДЖ, і ДР який здійснює обробку. На виході цього об'єкту будемо мати лунку чи знятий шар матеріалу, який характеризується об'ємом видаленого матеріалу за одиницю часу або продуктивністю.

Згідно з [1] напруга джерела є сумою падінь напруг на опорі ДЖ й опорі дуги (рис.1):

$$U_{дж} = U_{др} + IR. \quad (1)$$

Як видно з рис.1а, пряма $U_{дж}-IR$ перетинає характеристику дуги в точках А й В; здавалося б, горіння дуги можливо у двох режимах: при струмах I_A й I_B , тому що саме при цих струмах задовольняється (1). У дійсності стійко дуга може існувати тільки при струмі

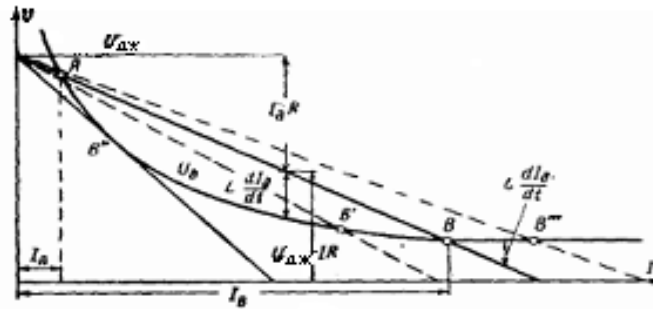
I_B , точка A визначає нестійкий режим дуги. Вираз (1) відповідає незмінному струму дуги; при змінах струму внаслідок індуктивності контуру з дугою в ньому з'явилася б проти-е.р.с. й замість (1) ми повинні написати:

$$U_{дж} = U_{др} + IR + L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

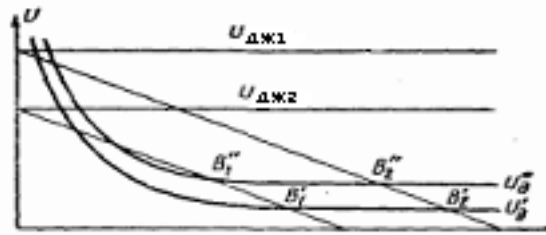
З рис.1а [1] видно, що при збільшенні струму ($I > I_B$) значення цієї проти е.р.с. буде

$$L \frac{dI}{dt} = U_{дж} - U_{др} - IR. \quad (3)$$

від'ємним, тоді від'ємним буде значення dI/dt . Це приведе до того, що струм знову почне зменшуватися до початкового значення.



а) спільні вольт-амперні характеристики дуги, джерела живлення й баластового опору R у колі дуги;



б) зміни положення робочої точки спільної характеристики при зміні довжини дуги або напруги джерела

Рисунок 1 - До питання про стійкість дуги постійного струму

Навпаки, якщо струм або стане меншим, ніж I_B , де $L \frac{dI}{dt}$ буде додатним, внаслідок чого струм знову збільшиться до I_B . Це показує, що в режимі точки B струм буде підтримуватися незмінним, тобто дуга горить стійко.

В точці A випадковому збільшенню струму відповідає позитивне значення проти е.р.с.; отже, струм буде й далі зростати до значення I_B при якому наступить стійкий стан. Якщо ж струм став би менше I_A , то проти е.р.с. прийняла б від'ємне значення й струм зменшився б до нуля, тобто розряд припинився б. Отже, A є точкою нестійкого режиму й дуга при струмі I_A стабільно горіти не може.

При збільшенні опору R пряма $U_{дж} - IR$ повернеться навколо точки напруги холостого ходу джерела по годинниковій стрілці й точка B переміститься вліво в положення B' . Межею збільшення R є таке його значення $R_{дон}$ при якому пряма $U_{дж} - IR$ стає дотичною до характеристики дуги (точка B''), тому що при $R > R_{дон}$ дуга взагалі горіти не може. При зменшенні опору точка B переміщується вправо, тобто зростає струм дуги (точка B'''). Отже, змінюючи опір R , можна змінювати стійке значення струму дуги.

Якщо змінюється напруга джерела живлення, то пряма $U_{дж} - IR$ при незмінному значенні R переміщається паралельно самій собі; очевидно, цим способом також

можна змінювати в широких межах струм дуги. Нарешті, зміна довжини дуги викликає перехід на іншу її характеристику, розташовану вище колишньої

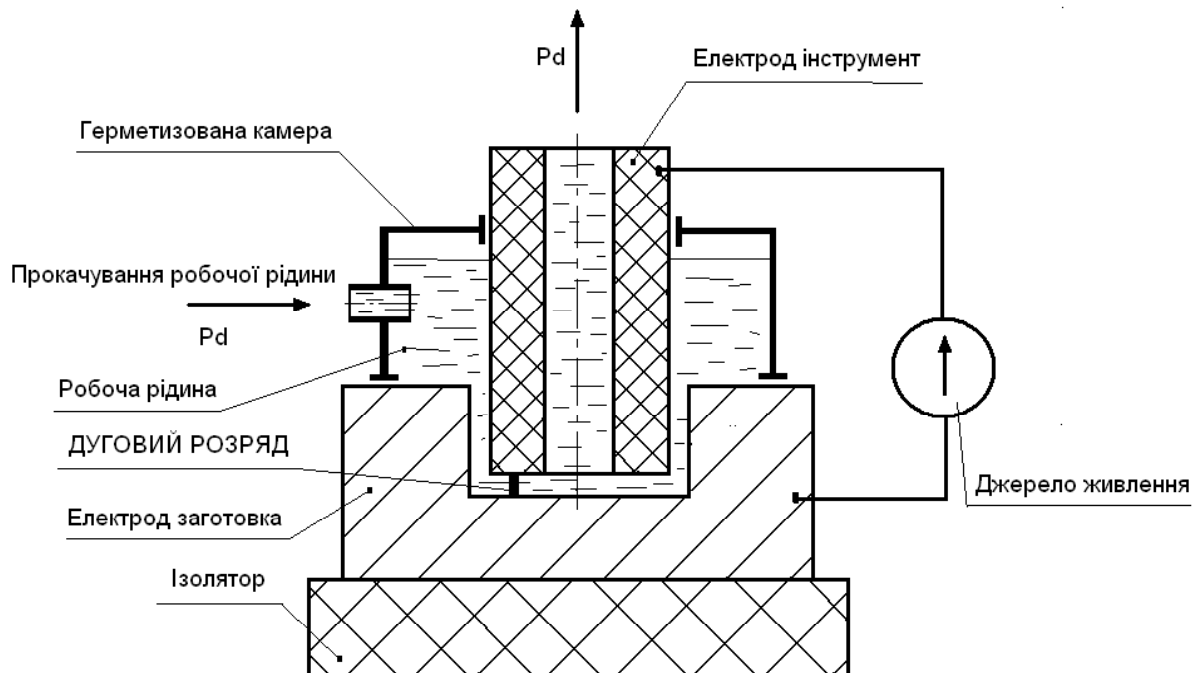


Рисунок 2 - Принципова схема процесу РОД

при подовженні дуги або нижче її при скороченні довжини дуги (рис. 2б). При цьому струм дуги змінюється в значних межах і для відновлення його початкового значення необхідно відповідно змінити або значення напруги джерела, або значення опору R .

Отже, якщо дуга живиться від джерела із жорсткою зовнішньою характеристикою, то струм її можна змінити трьома шляхами: зміною напруги джерела, зміною довжини дуги (відстані між електродами) і зміною опору контуру.

Розглянемо принципову схему процесу РОД яку зображено на рис. 2

Як відомо[1], електричні процеси відбуваються в електричному колі, що складається з ДЖ та ДР (рис. 3); тут E , $R_{\text{в}}$, $L_{\text{в}}$, $U_{\text{дж}}$, $I_{\text{дж}}$ - відповідно ЕРС, внутрішній опір, внутрішня індуктивність, напруга та струм джерела живлення; $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ - напруга та струм дуги. Цілком очевидно, що $U_{\text{дж}} = U_{\text{д}}$, а $I_{\text{дж}} = I_{\text{д}}$.

У першому наближенні нас цікавить поведінка ДР без впливу автоматики керування джерелом живлення та автоматики керування переміщенням ЕІ.

Як вказано вище опір дуги пропорційний її довжині та обернено пропорційний силі струму. При збільшенні $I_{\text{д}}$ збільшується не густина струму, а поперечна площа дуги. Звідси маємо:

$$R_{\text{д}} = k_1 \frac{l}{I_{\text{д}}}, \quad (4)$$

де $R_{\text{д}}$ – опір дуги;

k_1 – коефіцієнт пропорційності;

l – величина між електродного проміжку(зазор);

$I_{\text{д}}$ – сила струму;

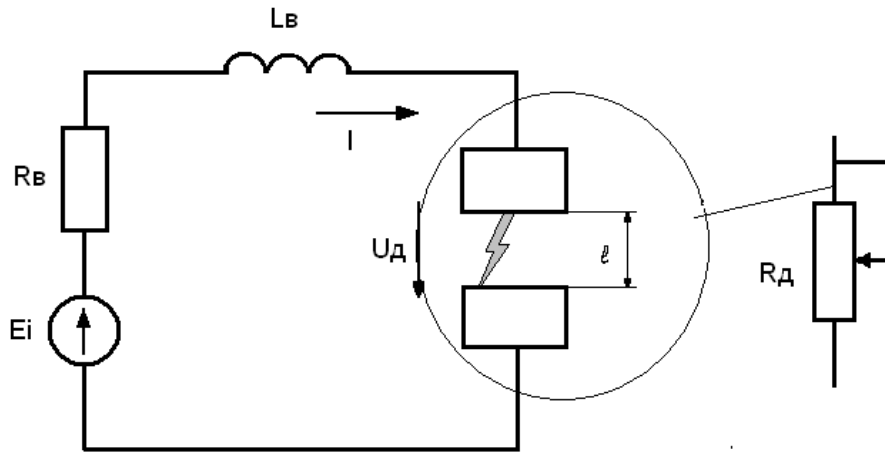


Рисунок 3 - Еквівалентна схема для обчислення швидкості видалення матеріалу

Згідно з законом Ома для повного електричного кола (рис.4)

$$I_{\partial} = \frac{E_i - L_{\partial} I'_{\partial}}{R_{\partial} + R_{\partial}}; \quad \text{або} \quad I'_{\partial} = \frac{E_i - I_{\partial} (R_{\partial} + R_{\partial})}{L_{\partial}}, \quad (5)$$

де E_i – електрорушійна сила джерела струму;

L_{∂} – індуктивність електричного кола;

R_{∂} – внутрішній опір електричного кола;

R_{∂} – опір дуги.

Потужність ДР

$$P_{\partial} = I_{\partial} R_{\partial}^2. \quad (6)$$

Швидкість видалення або з'єму матеріалу пропорційна потужності ДР тоді

$$dl = k_l R_{\partial} I_{\partial}^2 \cdot dt, \quad (7)$$

і тому, що опір ДР не залежить від напрямку I_{∂}

$$R_{\partial} \approx k_r \frac{l}{I_{\partial}}; \quad (8)$$

$$dl = k_l k_r I_{\partial} \cdot dt; \quad (9)$$

$$dl = k l I_{\partial} dt; \quad (10)$$

$$\frac{dl}{dt} = k l I_{\partial}. \quad (11)$$

Підставивши (8) в (5) отримаємо

$$\frac{dI_{\partial}}{dt} = \frac{E_i - R_{\partial} I_{\partial} - k_r l}{L_{\partial}}. \quad (12)$$

Рівняння (11) та (12) складають систему лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, які встановлюють зв'язок між уведеною потужністю у МП та швидкістю видалення матеріалу.

$$\begin{cases} \frac{dI_{\delta}}{dt} = \frac{E_i - R_{\delta}I_{\delta} - k_r l}{L_{\delta}} \\ \frac{dl}{dt} = kI_{\delta} \end{cases} \quad (13)$$

Систему рівнянь (13) вирішено у математичному пакеті MATLAB, зокрема засобами SIMULINK.

Щоб побудувати ММ, яка адекватно відбиває фізичний процес виберемо відповідні коефіцієнти. З експерименту процесів РОД [2] маємо $I_{\delta} = 100A$ при $U_{\delta} = 25B$, що дає опір у 0.25 Ом при значенні МП – $l \cong 1-2 \text{ мм}$ ($10^{-3}m$), що є оцінкою $k_r=250$. Е.Р.С ДЖ складає $50-100B$. Загальний опір устаткування РОД є близьким до $R = \frac{100}{100 - 25} \approx 1.2 \text{ Ом}$. Початковий зазор l_0 прийнято з чисельного експерименту для співпадання часу запалення ДР. Швидкість видалення матеріалу k реально залежить від площі ЕІ та матеріалу ЕЗ і змінюється в дуже широких межах. Цей коефіцієнт підібрано для більш наглядного відображення плинущу процесу РОД у часі і має значення $k=1.1$.

На рис.4 наведено модель вирішення системи диференціальних рівнянь, а на рис.5 відповідні графіки залежностей швидкості видалення(з'єму) матеріалу при горінні ДР в системі без подачі електрода інструмента.

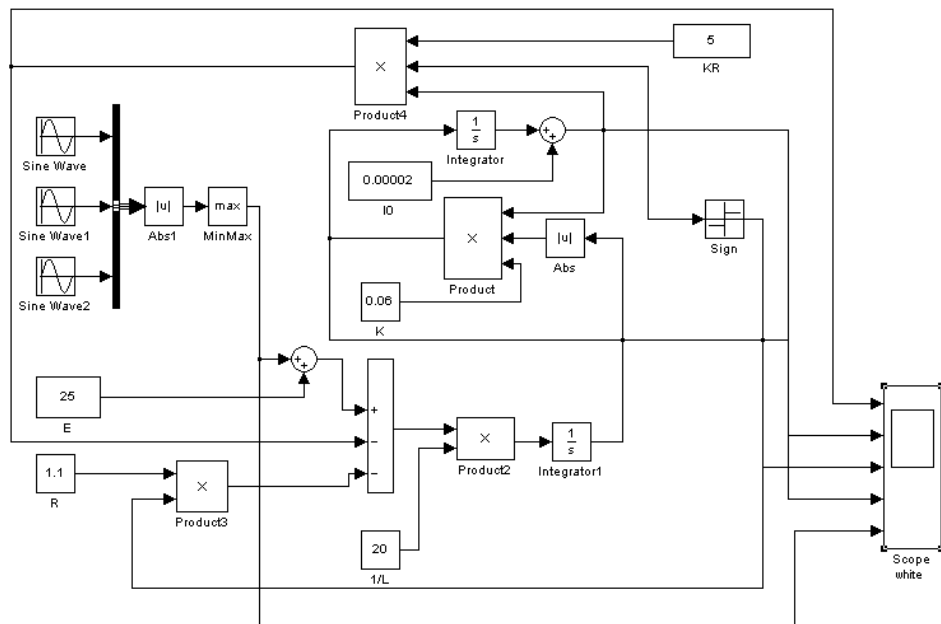


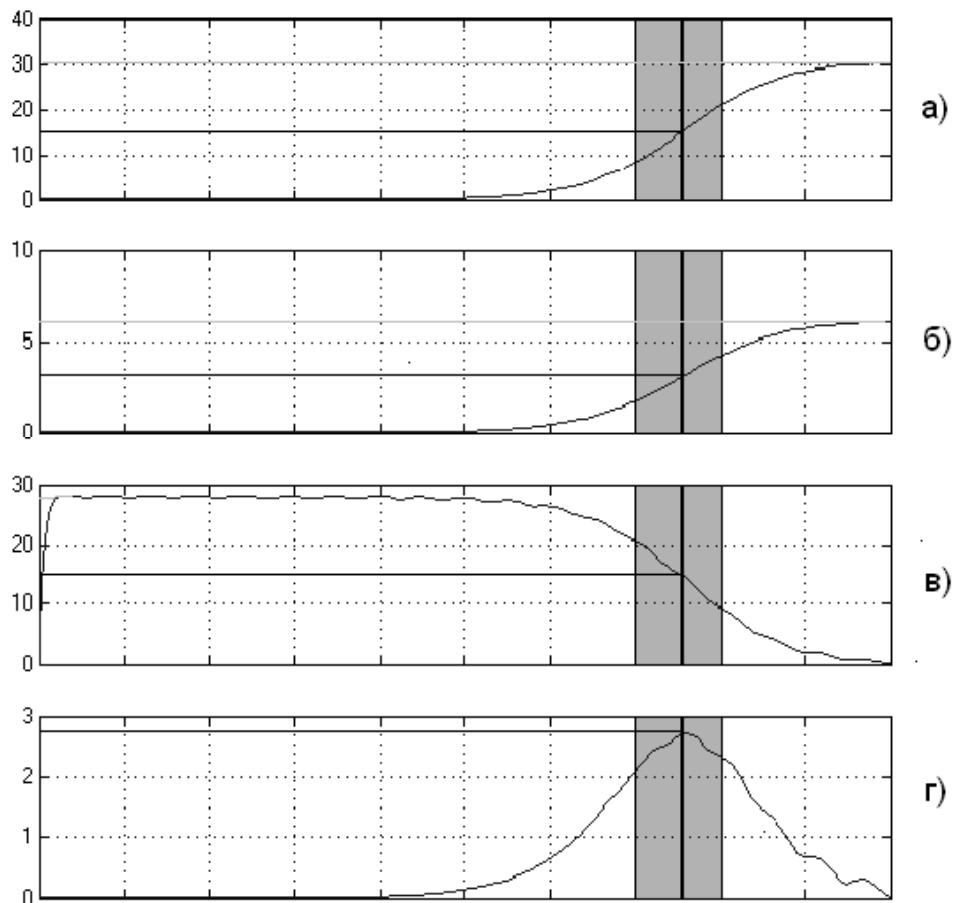
Рисунок 4 - Модель для визначення продуктивності (з'єму матеріалу) ДР РОД при сталому положенні ЕІ відносно ЕЗ

На рис.5 наведені графіки залежностей змінення параметрів моделі у часі.

З наведених графіків можна зробити наступні висновки:

- ДР при використанні ДЖ постійного струму не є безперервним у часі при незмінному положенні ЕІ відносно ЕЗ;
- щоб отримати найвищу продуктивність процесу РОД потрібно утримувати падіння напруги у міжелектродному проміжку близьке до $\frac{1}{2}$ значення ЕРС ДЖ.;
- подача ЕІ відносно ЕЗ повинна вибиратися у залежності від параметрів, які можна визначити з [13] системою автоматики;

- удосконалення ММ потребує введення залежностей від електромагнітних, теплових та гідродинамічних факторів, які впливають на ТП РОД.



а) зміна $I_{дж}$; б) зміна I (відстань між ЕІ та ЕЗ); в) зміна; $U_{дж}$
г) швидкість видалення матеріалу при ДР РОД(продуктивність)

Рисунок 5 - Графіки залежностей параметрів моделі ДР при РОД

Список літератури

1. Александров А.Г., Милютин В.С. Источники питания для дуговой сварки. – М.: Машиностроение. – 1982. – 77с.
2. Насуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой. – Электронная обработка материалов; 2005; №1.- С.8-17
3. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. – М.: Наука. – 1973. – 544 с.
4. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
5. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука. – 1975. – 300 с.
6. Евгения Бенькович и др. Практическое моделирование динамических систем- СПб.: БХВ-Петербург, 2002.- 464 с.

В статье рассмотрен вопрос построения математической модели дугового разряда, который возникает при электроэрозионной обработке токопроводящих материалов методом РОД и постоянном положении электрода инструмента относительно электрода заготовки.

The question of construction of mathematical model of arc digit which arises up at the electromachining of tokoprovodyaschykh materials by a method ROD and permanent position of electrode of instrument in relation to the electrode of purveyance is considered in the article.