УДК 620.197

В.І. Осипенко, д.т.н., проф.
Д.О. Ступак, к.т.н., доц.
Є.В. Хижняк, асист.
Черкаський державний технологічний університет
Л.Г. Полонський, д.т.н., проф.
Житомирський державний технологічний університет

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ ДРОТЯНОГО ЕЛЕКТРОДА В УМОВАХ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ВИРІЗАННЯ

В статті розглянуто механізм збурення та перебігу коливань дротяного електрода в процесі електроерозійного вирізання. Експериментальним шляхом та за допомогою математичного моделювання визначено вплив фізико-технологічних умов електроерозійного вирізання на параметри коливань дротяного електрода. Отримані результати дозволяють прогнозувати параметри коливань дроту і регулювати їх з метою підвищення якості обробки.

Вступ. Розробка високоефективних технологій і устаткування займає важливе місце серед пріоритетних напрямків розвитку машинобудування, що визначають науково-технічний прогрес. Розвиток технологій у машинобудуванні і, відповідно, у всьому виробництві пов'язаний з широким застосуванням таких технологій, що забезпечують екологічність, ресурсо- і енергозбереження при обробці як традиційних матеріалів (сталь, кольорові метали), так і високоміцних металевих композиційних матеріалів. Електроерозійна вирізна технологія в даний час є одним з найбільш розповсюджених методів високоефективної обробки твердих і надтвердих струмопровідних матеріалів. В умовах сучасного виробництва значно зросли вимоги до точності та якості обробленої поверхні. Отже, проблема пошуку нових перспективних шляхів підвищення продуктивності електроерозійного дротяного вирізання постає особливо гостро.

Одним із важливих факторів, що впливають на якісні показники електроерозійної обробки, є коливання дротяного електрода (ДЕІ). Безпосередній вплив коливання дротяного електрода-інструмента справляють на формування мікрогеометрії обробленої поверхні, умови виникнення пробою та баланс енергії одиничного іскрового розряду. Розроблено ряд математичних моделей [1], що описують коливання ДЕІ, однак відсутній аналіз впливу фізико-механічних властивостей матеріалу дротяного електрода, геометричних та енергетичних показників процесу електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ) на амплітудно-частотні

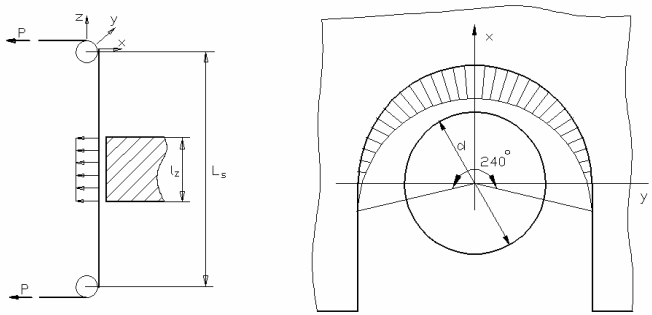
© В.І. Осипенко, Д.О. Ступак, Є.В. Хижняк, Л.Г. Полонський , 2009

параметри коливань ДЕІ і, відповідно, на мікрогеометрію обробленої поверхні.

Основна частина.

Математичне моделювання процесу коливань дротяного електрода в умовах електроерозійного вирізання. Створені до сьогоднішнього дня моделі коливань [2–4], допускали ряд спрощень при моделюванні механізму виникнення і перебігу коливань ДЕІ. Збуджуюча дія розрядів, обумовлена тиском в каналі і в пузирі, розглядалась лише як сила, рівномірно розподілена вздовж зони обробки і спрямована від торцевої поверхні заготовки.

Для адекватного опису механізму коливань ДЕІ необхідно врахувати в рівнянні випадковий характер виникнення розряду в довільному місці дроту. При цьому одиничний розряд повинен описуватись не тільки енергетичними, але й часовими і просторовими характеристиками. Попередні дослідження [1] дозволили визначити зону в МЕП, в якій відбуваються розряди. Вона відповідає товщині деталі, охоплює ДЕІ на 240º. Розподіл розрядів в цій зоні можна вважати рівноймовірним протягом тривалого часу.



а) *б)*

Рис. 1. Розрахункова схема зусиль, що діють на ДЕІ в процесі ЕЕДВ: а – схема розподілу відтискаючих зусиль робочих розрядів вздовж ДЕІ і зусиль натягу дроту; б – схема радіального силового навантаження ДЕІ

Для математичного моделювання поведінки дротяного електрода використано лінійні диференціальні рівняння малих пружних коливань струни.

Рівняння, що характеризують поперечні коливання струни, мають вигляд [4]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\nu \frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \psi(z,t),$$

$$\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} + 2\nu \frac{\partial \upsilon}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial y^2} + \chi(z,t), \quad (1)$$

де u, υ – поперечні переміщення точок струни в напрямках осей x, y відповідно (вісь x співпадає з напрямом різу, вісь y – перпендикулярна напряму різу, z – координата по довжині ДЕІ);

$\psi(z,t)$, $\chi(z,t)$ – проекції вектора інтенсивності поперечних сил на осі x і y, віднесені до погонної маси ρF;

$\nu = R/2\rho F$ – коефіцієнт демпфування коливань;

$a = \sqrt{P/\rho F}$ – швидкість розповсюдження поперечних хвиль,

де P – натяг струни;

ρ – щільність матеріалу дроту;

F – площа поперечного перерізу дроту;

R – коефіцієнт сили опору середовища, віднесений до одиниці довжини струни.

Дані рівняння виконуються для умови, що струна є абсолютно гнучкою, має постійний натяг по довжині і незначну амплітуду коливань.

Внаслідок імовірнісного характеру виникнення розрядів аналітичний розв'язок системи (1) недоцільний, а тому використано чисельний метод розв'язку.

Для чисельного розв'язання диференціальних рівнянь (1) враховано наступні початкові і граничні умови, що відповідають реальним умовам електроерозійного вирізання.

Початкові умови:

– в момент часу $t = 0$, дріт знаходиться в стані спокою:

$$u(z)\Big|_{t=0} = 0;$$

$$\upsilon(z)\Big|_{t=0} = 0.$$

Граничні умови:

– дріт жорстко защемлений по краях:

$$u(t)\Big|_{z=0;z=l} = 0;$$

$$\upsilon(t)\Big|_{z=0;z=l} = 0.$$

Для чисельного розв'язку рівнянь використано метод кінцевих різниць. Різнична схема, записана за рівнянням (1), має вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{u_{i+1,j}-2u_{i,j}+u_{i-1,j}}{\tau^2}+2\nu\dfrac{u_{i+1,j}-u_{i-1,j}}{2\tau}= \\ =a^2\dfrac{u_{i,j+1}-2u_{i,j}+u_{i,j-1}}{h^2}+\psi(z,t); \\ \dfrac{\upsilon_{i+1,j}-2\upsilon_{i,j}+\upsilon_{i-1,j}}{\tau^2}+2\nu\dfrac{\upsilon_{i+1,j}-\upsilon_{i-1,j}}{2\tau}= \\ =a^2\dfrac{\upsilon_{i,j+1}-2\upsilon_{i,j}+\upsilon_{i,j-1}}{h^2}+\chi(z,t), \end{cases} \qquad (2)$$

де: $u_{i,j}, \upsilon_{i,j}$ – миттєве відхилення дротяного електрода в момент часу *i* в проекції на осі *x*,*y* відповідно, в точці *j*, що відповідає координаті по осі *z*;

$u_{i+1,j}, \upsilon_{i+1,j}$ – відхилення дротяного електрода в наступний момент часу;

$u_{i-1,j}, \upsilon_{i-1,j}$ – відхилення дротяного електрода в попередній момент часу;

$u_{i,j+1}$, $\upsilon_{i,j+1}$ – відхилення наступної точки дротяного електрода по осі *z*;

$u_{i,j-1}$ $\upsilon_{i,j-1}$ – відхилення попередньої точки дротяного електрода по осі *z*.

Рівняння, розв'язані відносно $u_{i+1,j}$, $\upsilon_{i+1,j}$, дозволять визначити відхилення дроту від положення спокою в кожний наступний момент часу *i+1* для визначеної координати по довжині дроту *j*.

В результаті перетворення рівняння (2) набули вигляду:

$$u_{i+1,j}=\frac{1-\nu\tau}{1+\nu\tau}(u_{i,j}-u_{i-1,j})+ \\ +\frac{1}{2}(u_{i,j+1}+u_{i,j-1})+\frac{\tau^2}{1+\nu\tau}\psi(x,t) \qquad (3)$$

$$\upsilon_{i+1,j}=\frac{1-\nu\tau}{1+\nu\tau}(\upsilon_{i,j}-\upsilon_{i-1,j})+$$

$$+\frac{1}{2}(\upsilon_{i,j+1}+\upsilon_{i,j-1})+\frac{\tau^2}{1+\nu\tau}\chi(x,t)$$

Для визначення проекцій силового впливу одиничного імпульсу на осі *x* та *y* враховуються наступні параметри:

– силова дія імпульсу;

– кут виникнення пробою відносно осі *x*;

– координата пробою по довжині електрода-дроту *z*.

При створенні математичної моделі коливань дані параметри задаються оператором випадкових чисел або за заздалегідь визначеною закономірністю.

Аналіз впливу фізико-механічних характеристик дроту та зусилля натягу на амплітудно-частотні параметри вільних коливань ДЕІ. Сучасний асортимент дротяних електродів для електроерозійного вирізання передбачає широкий спектр їх фізико-хімічних властивостей, велику розмаїтість матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, відповідно, різним типорозмірам дротяних електродів характерна відмінність їх фізичних характеристик, насамперед, густини матеріалу та жорсткості. Розмаїтість фізичних характеристик різних марок дротяних електродів пояснює низьку повторюваність результатів експериментальних досліджень картини перебігу їх коливань.

Для розробки методології керування параметрами коливань дротяного електрода з метою досягнення оптимальних умов обробки в математичній моделі необхідне врахування реальних механічних характеристик ДЕІ.

Величина натягу ДЕІ при електроерозійному вирізанні дозволяє в широких межах контролювати характер деформацій дротяного електрода. В роботах [5–6] показано, що збільшення натягу дротяного електрода дозволяє зменшити прогин дротяного електрода і, як наслідок, звести до мінімуму похибку форми оброблюваного контуру. Проте, при збільшенні натягу ДЕІ, зростає ймовірність його обриву.

В процесі комплексних експериментальних досліджень та за допомогою математичного моделювання вивчено характер коливань дротяного електрода при варіюванні сили його натягу в межах від 5 до 40 Н. Дослідження проводились з використанням найбільш поширених типів дротяних електродів, для яких характерні значні відмінності

фізичних властивостей. При дослідженні вільних затухаючих коливань ДЕІ для виведення дроту зі стану рівноваги використовувався маятник з фіксованою масою *m* (рис. 2), що дозволило забезпечити однакові значення збуджуючих зусиль впродовж серії дослідів.

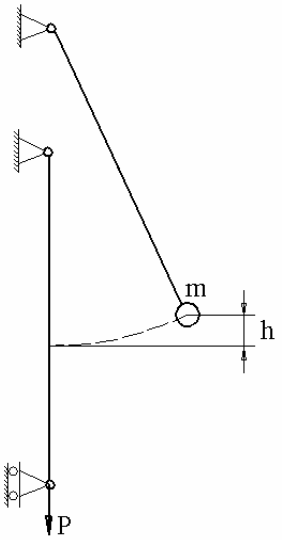


Рис. 2. Схема дослідження вільних коливань ДЕІ

На рис. 3 представлено графіки залежностей амплітуди коливань від натягу ДЕІ, що встановлено на основі розрахунків методом математичного моделювання. Для кожного з типів дротяних електродів розрахунки проведено не менше 5 разів, на графіку представлено середні значення та розкид результатів.

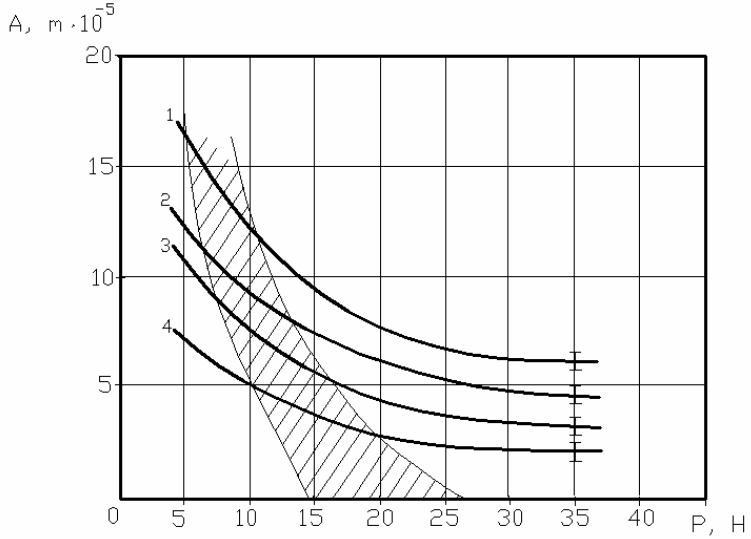
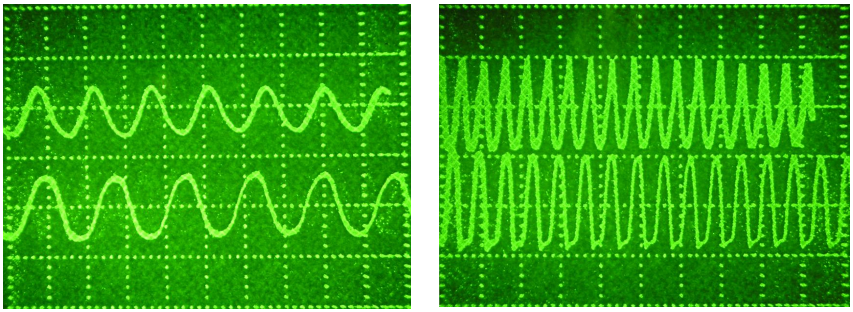


Рис. 3. Графік залежності середньої амплітуди коливань від натягу латунного дротяного електрода: 1 – 0,15 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,25 мм; 4 – 0, 3 мм

Як видно з графіків, при збільшенні натягу дротяного електрода спостерігається зменшення середньої амплітуди коливань. При цьому, значне зменшення середньої амплітуди коливань спостерігається на ділянках кривих, що відповідають натягу 5…15 Н. При подальшому зростанні натягу – зменшення амплітуди коливань незначне. На рис. 3 виділено зону практичного використання латунних ДЕІ, збільшення натягу призводить до обриву ДЕІ, внаслідок руйнування матеріалу дроту.

Характер картини перебігу коливань при зміні натягу ДЕІ, що було встановлено, за допомогою математичної моделі, перевірено та підтверджено експериментально. Експериментальна перевірка математичної моделі була проведена з використанням ДЕІ ДКРПМ ФКТЛ 63 для натягу 5 та 25 Н (рис. 4). Миттєві значення відхилень ДЕІ від центрального положення фіксувались за допомогою системи оптичних датчиків та запам’ятовуючого осцилографа. Розбіжність розрахованих даних та експериментальних не перевищує 4 %.



а) *б)*

Рис. 4. Осцилограми коливань середньої точки латунного дротяного електрода діаметром 0,2 мм через 0,5 с після збурення: а) при зусиллі натягу ДЕІ 5 Н; б) при зусиллі натягу ДЕІ 25 Н

Як видно з наведених осцилограм, характер зміни амплітуди коливань ДЕІ відповідає розрахункам згідно з математичною моделлю. Збільшення натягу з 5 до 25 Н для латунного дротяного електрода діаметром 0,2 мм призвело до зменшення амплітуди коливань і збільшення частоти.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що при обробці прямолінійних траєкторій і у випадках, коли похибкою форми деталі в кутах можна знехтувати, доцільно встановлювати натяг ДЕІ в межах 15...17 Н, що дозволить отримати якісну поверхню і запобігти обриву дротяного електрода.

Аналіз впливу енергетичних характеристик ЕЕВО на перебіг коливань. Енергетичні процеси, що відбуваються в міжелектродному проміжку, вносять вирішальний вплив на виникнення і перебіг коливань дротяного електрода. При цьому існує технологічна можливість керування в широких межах енергетичними параметрами процесу ЕЕВО, що, в свою чергу, дозволяє досягати оптимальних показників коливань дротяного електрода [7].

Загалом, силовий вплив на дротяний електрод, який в підсумку і збуджує коливання ДЕІ, породжується наступними силами електричного походження:

– електростатичні сили притягання між електродами, що виникають внаслідок наявності між ними електричної ємності;

– електродинамічні сили, що виникають внаслідок взаємодії струмів в ДЕІ та в заготовці;

– сили відтиску, що створюються у каналі розряду.

Як було встановлено в попередніх дослідженнях [8], вирішальний вплив на параметри коливань дротяного електрода мають сили, що

виникають внаслідок високого тиску в каналі розряду. Шляхом математичного моделювання встановлено залежність силового впливу на дротяний електрод з боку одиничного розряду від технологічних показників електроерозійної обробки, а саме, напруги і струму робочих імпульсів.

Величину відтискаючого впливу одиничного розряду розраховано через тиск p_k в каналі розряду та радіус каналу розряду r_k:

$$p_k = 3.5 \cdot 10^{-3} \cdot T_k \cdot \left[\frac{P}{a} \right]^{5/4} \cdot \Delta W_{ion}{}^{-6/4} \cdot t^{-5/4}, \quad (4)$$

де T_k – поточна температура в каналі розряду;

ΔW_{ion} – приріст питомої внутрішньої енергії, необхідний для іонізації міжелектродного проміжку;

t – тривалість імпульсу;

P_{cp} – середня потужність робочого імпульсу:

$$P_{cp} = U_{cp} \cdot I_{cp}, \quad (5)$$

U_{cp} – середнє значення напруги робочого імпульсу;

I_{cp} – середнє значення струму;

$$r_k = \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{P}{a} \right]^{3/4} (t^{5/4} - t_k{}^{5/4}) + r_{k0}{}^2}, \quad (6)$$

де t_k – час утворення каналу розряду;

r_{k0} – початковий радіус каналу розряду.

Звідси

$$F_1 = \pi r_n^2 p_n. \quad (7)$$

На рис. 5 показано графік залежності амплітуди коливань дротяного електрода від силового впливу одиничного розряду, розрахований на основі математичної моделі.

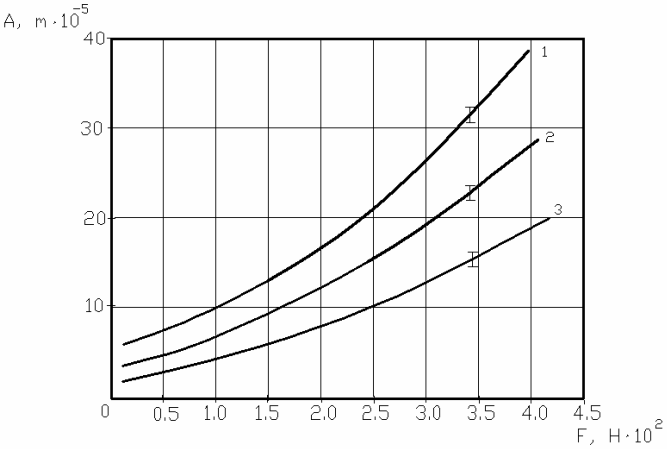
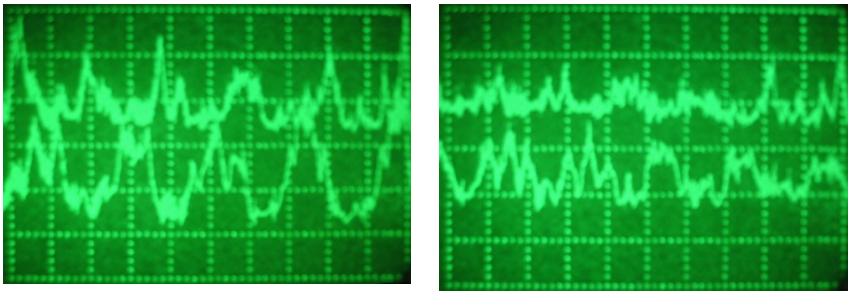


Рис. 5. Графік залежності амплітуди коливань ДЕІ від величини силового впливу робочих розрядів для латунних дротяних електродів діаметром: 1 – 0,15 мм, 2 – 0,20 мм, 3 – 0,25 мм

З аналізу отриманої залежності можна зробити висновок, що при збільшенні силового навантаження, яке спричиняє дія робочих розрядів, зростає амплітуда коливань ДЕІ. Проведення експериментальних досліджень показало відповідність математичної моделі реальним умовам ЕЕДВ.

На рис. 6 наведено осцилограми коливань дротяного електрода для напівчистового (а) та чорнового (б) режимів обробки.



а) *б)*

Рис. 6. Осцилограми коливань струму з датчиків системи вимірювання, що характеризують перебіг процесу коливань дротяного електрода для напівчистового (а) та чорнового (б) режимів обробки

Аналіз впливу величини розхилу скоби на перебіг коливань ДЕІ. Одним із найважливіших чинників, що впливають на параметри коливань, є довжина дротяного електрода між точками його фіксації. Конструкція електроерозійних вирізних верстатів дозволяє змінювати в широких межах відстань між точками фіксації ДЕІ шляхом регулювання розхилу скоби. Вибір оптимальної величини розхилу скоби в процесі електроерозійного вирізання залежить від ряду фізико-технологічних умов:

– технологічна зручність встановлення заготовки;

– можливість якісної промивки МЕП;

– мінімізація похибки форми обробленої поверхні, обумовленої прогином ДЕІ в кутах.

Проведені експериментальні дослідження, а також розрахунки за допомогою математичної моделі показали значний вплив величини розхилу скоби на амплітуду та частоту коливань ДЕІ. Проте для розробки практичних рекомендацій щодо вибору оптимальних технологічних умов обробки більш важливим є дослідження впливу на параметри обробки відносної величини *lz/Ls*, де *lz* – товщина заготовки, *Ls* – величина розхилу скоби. Схему дослідження представлено на рис. 7.

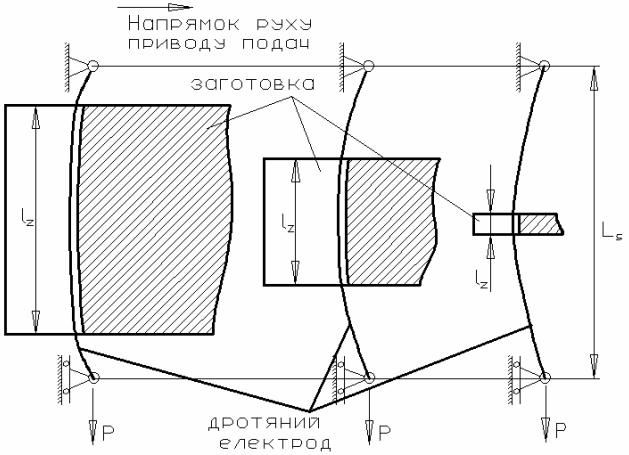


Рис. 7. Схема визначення впливу співвідношення товщини заготовки та розхилу скоби верстата на амплітуду вимушених коливань ДЕІ

Шляхом математичного та фізичного моделювання встановлено залежність між величиною максимальної амплітуди коливань ДЕІ та співвідношенням *lz/Ls* (рис. 8).

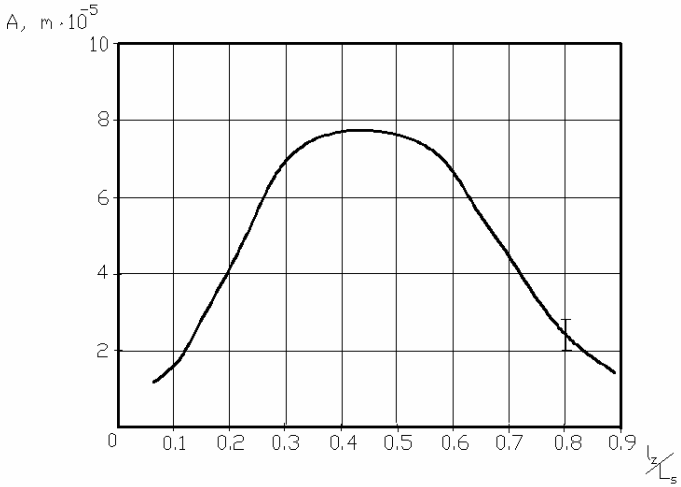


Рис. 8. Залежність амплітуди коливань дротяного електрода від співвідношення товщини оброблюваної деталі до відстані між направляючими ДЕІ (lz/Ls), розрахована за допомогою математичної моделі

Як видно з графіка, встановлена залежність є нелінійною. Так, при відношенні товщини заготовки до відстані між направляючими *lz/Ls* = 0,1...0,4 спостерігається зростання максимальної амплітуди коливань. В діапазоні *lz/Ls* = 0,5...0,9 спостерігається спадання максимальної амплітуди коливань. Наявність максимуму залежності в діапазоні *lz/Ls* = 0,4...0,5 пояснюється тим, що при вказаному відношенні довжини робочої ділянки дротяного електрода до довжини ДЕІ між направляючими, силовий вплив робочих розрядів вже значно переважає демпфуючі властивості дроту, а питоме силове навантаження по довжині дроту ще досить значне.

З аналізу отриманої залежності можна зробити висновок, що більш доцільно проводити ЕЕВО при виконанні умови 0,25 < *lz/Ls* та *lz/Ls* > 0,75. Проте, враховуючи вимоги щодо необхідності якісної промивки МЕП оптимальним є встановлення більшої величини *lz/Ls*, тобто встановлення камер промивання максимально близьке до заготовки.

Висновки:

1. Розроблено та експериментально перевірено математичну модель, яка враховує випадковий характер виникнення розряду і адекватно описує коливальний характер поведінки дротяного електрода в умовах електроерозійного вирізання.

2. Встановлено, що при збільшенні натягу амплітуда коливань дротяного електрода зменшується. Залежність амплітуди коливань від натягу ДЕІ є нелінійною. Найбільший вплив величини натягу на параметри коливань спостерігається в діапазоні 5…15 Н.

3. Встановлено, що залежність амплітуди коливань ДЕІ від розтвору скоби має максимум в діапазоні $0{,}4 \le lz/Ls \le 0{,}5$. Наявність максимуму пояснюється тим, що при вказаному відношенні довжини робочої ділянки дротяного електрода до його довжини силовий вплив робочих розрядів вже значно переважає демпфуючі властивості дроту, а питоме силове навантаження по довжині дроту ще досить значне.

4. Встановлено залежність між амплітудою коливань дротяного електрода та напругою і струмом робочих імпульсів.

5. Доведено, що параметрами коливань дротяного електрода можливо опосередковано керувати шляхом регулювання натягу, геометричних розмірів та фізичних властивостей ДЕІ, а також енергетичних параметрів робочих імпульсів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кобзарь В.А., Лукашева Е.Н.* Математическая модель колебаний электрода-проволоки при электроэрозионной обработке // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 2. – С. 16–23.
2. *Puri A.B., Bhattacharyya B.* Modelling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM // Journal of Materials Processing Technology. – № 141. – 2003. – Pp. 295–301.
3. *Arunachalam C., Aulia M., Bozkurt B., Eubank P.T.* Wire Vibration, Bowing and Breakage in Wire EDM // Berichte. – № 1405. – 1998.
4. *Перестюк М.О., Маринець В.В.* Теорія рівнянь математичної фізики: Навч. посібник. – К.: Либідь, 2001. – 336 с.
5. *Коренблюм М.В.* О связи величины шероховатости поверхности с длительностью и амплитудой импульсов разрядного тока при электроэрозионной обработке // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 4. – С. 135–138.
6. *Осипенко В.И, Хижняк Е.В., Ступак Д.О.* Методика исследования колебаний проволочного электрода при электроэрозионной вырезной обработке // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 278–280.

7. *Золотых Б.Н., Трофимова Н.Б.* Экспериментальное исследование пробоя жидкостей в условиях электроискровой обработки // Электронная обработка материалов. – 1969. – № 4. – С. 33–36.
8. *Осипенко В.І., Ступак Д.О., Хижняк Є.В*. Математична модель коливань дротяного електрода // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 4. – С. 78–84.

ОСИПЕНКО Василь Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обладнання переробних і харчових виробництв Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– процеси електроерозійної обробки;

– розробка конструкцій електроерозійних вирізних верстатів.

Тел.: (097)6439091.

E-mail: osip5906@rambler.ru

СТУПАК Денис Олегович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри енерготехнологій Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– процеси електроерозійного дротяного вирізання.

Тел.: (0472)382993.

E-mail: stupak@uch.net

ХИЖНЯК Євген Валерійович – асистент кафедри комп'ютеризованих технологій високоефективної обробки матеріалів Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання електроерозійного дротяного різання.

Тел.: (0472)452663.

E-mail: ehizh@rambler.ru

ПОЛОНСЬКИЙ Леонід Григорович – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– захисні покриття.

Тел.: (0472)452663.

E-mail: pol@ztu.edu.ua

Подано 03.02.2009