

УДК 621.791.927

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

Бережна<sup>1</sup> О.В., Кассов<sup>2</sup> В.Д., Грибков<sup>2</sup> Е.П., Бережний<sup>2</sup> М.О.

1 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.

2 – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

*Анотація.* Розглянуто процес формування покриття при електроконтактному наварюванні. Розроблено математичну модель формування покриття. Застосовано метод числового рекурентного вирішення кінцево-різницевої форми виділеного елементарного об'єму покриття в умовах статичної рівноваги.

*Ключові слова:* електроконтактне наварювання, математична модель, функціональні покриття.

Короткочасність термомеханічного впливу при електроконтактному наварюванні з одного боку дозволяє знизити термічний вплив на матеріал покриття і деталі, а з іншого боку – ускладнює забезпечення точності прогнозування якості одержуваного шару. Якісними показниками навареного шару є міцність зчеплення, структурна однорідність, геометричні параметри шару. Термін служби відновленого виробу безпосередньо залежить від міцності зчеплення покриття з деталлю. З метою підвищення міцності зчеплення привареного шару з поверхнею деталі застосовують такий традиційний технологічний захід, як нанесення рельєфу на поверхні деталі [1] або електродного матеріалу, що вимагає введення додаткової операції у технологічний процес відновлення [2]. Важливу роль у формуванні навареного шару та утворенні його міцного зчеплення з поверхнею деталі відіграє зварюваність матеріалів, визначення якої для різнорідних матеріалів на етапі проектування технологічного процесу відновлення дозволяє здійснити раціональний вибір додаткових технологічних прийомів [3]. В процесі експлуатації при низькій міцності зчеплення відбувається відшаровування навареного шару, що визначає пріоритетний напрямок при розробці технології електроконтактного наварювання, а також оптимальних режимів процесу з урахуванням відповідних технологічних рекомендацій. Таким чином, актуальною є задача розробки технологічних заходів щодо підвищення міцності зчеплення покриття з деталлю при одночасному забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик покриття.

Одним із широко відомих способів підвищення міцності зчеплення шару, що приварюється, з поверхнею деталі є інтенсифікація процесу наварювання за рахунок збільшення коефіцієнту тертя в зоні контакту деталі з електродним матеріалом за рахунок створення протилежно спрямованого моменту обертання при протіканні імпульсу струму [4]. Істотний вплив на зміну коефіцієнту тертя в зоні електроконтактного наварювання чинить асиметрія процесу за рахунок контрольованої зміни кінематичних, трибологічних та фізико-механічних параметрів. Найбільш керованим і ефективним з точки зору впливу на зміну коефіцієнту асиметрії є співвідношення лінійних швидкостей ролика-електроду та виробу, що при створенні кінематичної асиметрії дозволяє збільшити коефіцієнт тертя.

Для визначення раціональних технологічних режимів електроконтактного наварювання незалежно від властивостей та форми матеріалу [5, 6] необхідно дослідити характер впливу основних технологічних факторів на напружено-деформований стан матеріалу в осередку взаємодії. Математичну модель процесу електроконтактного наварювання деталей типу «вал» розроблено на основі числового рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умов статичної рівноваги виділених елементарних об'ємів вздовж зони пластичної деформації, розділеної на скінчене число елементарних об'ємів.

Згідно зі специфікою умов реалізації досліджуваної технології необхідно відмітити, що колові швидкості обертання деталі і електродного матеріалу на виході з осередку пластичної деформації є рівними. Отже, на поверхні деталі присутня тільки зона

відставання. Напрямок дотичних контактних напружень співпадає з напрямком процесу наварювання в цій зоні. Колова швидкість ролика-електроду трохи нижча швидкості деталі згідно з припущеннями [7]. Окрім вказаних вище, було прийнято ще низку припущень, основними з яких є наступні:

- деформація електродного матеріалу є пласкою й усталеною у часі. Кінематика пластичної течії матеріалу підлягає гіпотезі пласких перетинів. Нормальні осьові напруження та показники подвійного опору зсуву змінюються тільки вздовж зони пластичного формозмінення;
- вздовж кожного виділеного елементарного об'єму, поточні значення товщин, нормальних контактних та дотичних контактних напружень змінюються лінійно;
- аналітичні описи дотичних контактних напружень підлягають закону пластичного тертя;
- наявність зони пружної деформації електродного матеріалу в перетинах на вході в осередок, а також наявність інерційних складових умови рівноваги, через їх незначний вплив не враховували.

З урахуванням характеру прийнятих допущень і кінцево-різницевої форми запису основних компонент напружено-деформованого стану, умова статичної рівноваги для обраного елементарного об'єму при проектуванні всіх зусиль на ось  $X$  має наступний вигляд:

$$\sigma_{xi2}h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2 + \quad (1)$$

$$+ (2K_{xi1}\mu_{x1i1} + 2K_{xi2}\mu_{x1i2})\Delta x/2 + (2K_{xi1}\mu_{x2i1} + 2K_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 = 0,$$

де  $\sigma_{xi2}$ ,  $\sigma_{xi1}$  і  $p_{xi2}$ ,  $p_{xi1}$  – позитивні значення нормальних компонент тензору напружень, які відповідають напруженням стискання;

$\Delta x$  – величина кроку розбивки зони пластичної деформації;

$h_{xi1}$ ,  $h_{xi2}$  – поточне значення товщини електродного матеріалу на вході та на виході з термдеформаційного осередку;

$2K_{xi1}$ ,  $2K_{xi2}$  – поточні показники подвійного опору зсуву;

$\mu_{x1i1}$ ,  $\mu_{x2i1}$ ,  $\mu_{x2i2}$ ,  $\mu_{x1i2}$  – поточні значення коефіцієнту пластичного тертя.

Під час розрахунку локальних характеристик напружено-деформованого стану в рамках зон пластичного змінення електродного матеріалу шляхом числового інтегрування виконували визначення зусилля  $P$  і моментів  $M_1$ ,  $M_2$  процесу електроконтактного наварювання:

$$P = \left[ \sum_{i=1}^n (p_{xi1} + p_{xi2})\Delta x/2 \right] b; \quad (2)$$

$$M_1 = \left[ \sum_{i=1}^n (p_{xi1}\mu_{x1i1} + p_{xi2}\mu_{x1i2})\Delta x/2 \right] bR_{b1}; \quad (3)$$

$$M_2 = \left[ \sum_{i=1}^n (p_{xi1}\mu_{x2i1} + p_{xi2}\mu_{x2i2})\Delta x/2 \right] bR_{b2}. \quad (4)$$

Моделювання теплового стану електродного матеріалу в термдеформаційному осередку при електроконтактному наварюванні проводили, представляючи електродний матеріал у вигляді необмеженої пластини [8]. Процес нагріву розраховано згідно з теорією теплопровідності. Електродний матеріал знаходиться в тепловій рівновазі з навколишнім середовищем, тобто температура електродного матеріалу дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_0$ . Теплообмін між поверхнями електродного матеріалу та поверхневого шару деталі в термдеформаційній зоні відбувається за законом Ньютона. Вважаємо, що початок координат розташовано всередині електродного матеріалу. Тоді  $r$  – половина товщини електродного матеріалу, тобто  $r = h_{xi1}/2$ . Для визначення розподілу тепла в будь-який момент часу необхідно вирішити диференційне рівняння теплопровідності Лапласу:

$$\frac{\partial T_m(y, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_m(y, t)}{\partial y^2}; \quad (5)$$

$$(t > 0; -r < y < r)$$

при початкових та граничних умовах:

$$T_m(y, 0) = T_0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_m(0, t)}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_m(r, t)}{\partial y} + \alpha [T(t) - T_m(y, t)] = 0, \quad (8)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну.

Відносна температура у будь-якій точці електродного матеріалу в термодформаційному осередку є функцією безрозмірних величин критерія Фур'є  $Fo$ , критерія Біо  $Bi$  та співвідношення  $y/r$  [9]. На осі електродного матеріалу, тобто при  $y = 0$ , приймає вигляд:

$$\frac{\Delta T_m}{Pd} = Fo - 0,5 \left(1 + \frac{2}{Bi}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (9)$$

де  $A_n$  – початкові теплові амплітуди;

$\mu_n$  – прості корені характеристичного рівняння.

В цій точці температура електродного матеріалу мінімальна. Знаючи розподіл температурних полів вздовж електродного матеріалу в термодформаційному осередку, можна обчислити необхідну силу струму:

$$I = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\frac{T \pi^2 x_i h_{xi} \lambda c g}{r \delta t_i}}. \quad (10)$$

Представлена сукупність аналітичних описів склала повний алгоритм з числового одномірного математичного моделювання процесу електроконтактного наварювання деталей типу тіл обертання.

#### Список літератури:

1. Сатонін О.В. Спосіб електроконтактного наплавлення / О.В. Сатонін, О.В. Бережна, С.В. Малигіна // Патент №88576 України на винахід. МПК В23К 35/00 (2006.01). №у 2013 10799. Заявл. 09.09.2013. Опубл. 25.03.2014. Бюл.№6. 4с.
2. Бережна О.В. Спосіб відновлення поверхонь деталей типу вал / О.В. Бережна, П.А. Гавриш, В.Д. Кузнецов // Рішення про видачу деклараційного патенту України на корисну модель. МПК В23К11/00(2006.01), В22D19/00(2006.01), В22D19/06(2006.01). №у 2017 10242. Заявл. 23.10.2017.
3. Бережна О.В. Спосіб визначення зварюваності різномірних металів / О.В. Бережна, М.А. Турчанін, В.Д. Касов, П.А. Гавриш // Патент №106718 України на корисну модель. МПК В23К 31/12 (2006.01). №у 2015 08944. Заявл. 16.09.2015. Опубл. 10.05.2016. Бюл. №9. 4с.
4. Зезюля В.В. Спосіб електроконтактної наплавки / В.В. Зезюля, В.В. Бульчев // Патент №2466000 Росії. МПК В23К 11/06. Заявл. 30.12.2010. Опубл. 10.11.2012.
5. Бережная Е.В. Математическое моделирование формообразования слоя при электроконтактной наплавке проволокой деталей типа вал / Е.В. Бережная, Э.П. Грибков // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2014. – №6. – Ч.2. – С.93-96. – ISSN: 1998-7927 (Print).
6. Бережная Е.В. Математическое моделирование напряжений и деформаций при электроконтактной наплавке проволок цилиндрических деталей / Е.В. Бережная, С.Н. Грибкова // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2013. – № 1 (14). – С. 206-213. – ISSN: 2218-1806 (Print).
7. Сатонин А.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при электроконтактной наплавке лент с использованием процессов прокатки / А.В. Сатонин, В.Д. Касов, Е.В. Бережная, В.А. Данилюк, К.Д. Махмудов // Обработка материалов давлением. – 2013. – №1 (34). – С.30-35. – ISSN: 2076-2151 (Print).
8. Воскресенский К.Д. Сборник расчетов и задач по теплопередаче / К.Д. Воскресенский // Рипол Классик. – 2013. – 342 с. – ISBN 5458353811.
9. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности / А.И. Вейник // Рипол Классик. – 2013. – 190 с. – ISBN 5458570960.