

Д. Волков, канд. техн. наук

Донбаська державна машинобудівна академія

ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРИСАДЖУВАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ПОРОШКОВИМ ДРОТОМ

***Резюме.** Побудовано статистичну модель, що пов'язує основні параметри технологічного процесу електроконтактного наплавлення порошковим дротом зі ступенем пластичного деформування останнього. Отримано рівняння математичної регресії, які доводять, що найбільший вплив на ступінь пластичного деформування порошкового дроту при електроконтактному наплавленні чинить сила та час протікання імпульсу електричного струму, а також хімічний склад порошкового осердя дроту.*

***Ключові слова:** рівняння регресії, контурний графік, електроконтактне наплавлення, присаджувальний матеріал, деформація, порошковий дріт.*

D. Volkov

STUDY OF THE FILLER MATERIAL PLASTIC DEFORMATION DEGREE UNDER RESISTANCE FUSING BY POWDER WIRE

Summary. Analysis of the researches and publications concerning the impact of the conditions of plastic deformation of filler materials on the reshaping of the cross-section of the wire and on the contact surface of the wire with base metal during the process of resistance fusing has been carried out by the authors. Available models of forming the connection during the resistance fusing with continuous wire have been investigated, and calculation estimation of the condition of plastic deformation effect on the density of active centers and the adhesion strength of coating with the base metal has been carried out. It has been stressed, that the process of deformation of the powder wire, that can be used as filler material under the resistance fusing, as well as the influence of the degree of its plastic deformation on the density of the resulting layer, adhesion strength and the technical and operational properties of coating have not been investigated enough. The key factors influencing the process of the powder wire deformation during the resistance fusing have been found and analyzed. Basing on the results of experimental studies and mathematical processing of the results in the software environment Statistica_V6 (StatSoft) the mathematical and statistical models of the process of plastic deformation of filler material as the powder wire during resistance fusing have been developed and built. While developing this model the following operations were conducted: testing of the reproducibility of experiments, determination of the mathematical regression coefficients, checking of the linear model correctness, as well as the evaluation of the importance of the regression coefficients of the derived equations. The degree of plastic deformation of filler material was found to be dependent on the combination of the main parameters of the resistance fusing regime. Thus, by increasing the strength and time of the electrical pulse fusing impulse and the electrical resistance of the powder filler core the deformation degree increases as well. The increase of the powder wire shell thickness and the effort on the roller-electrode within certain limits results in the decrease of the plastic deformation degree of filler materials during resistance fusing.

Key words: regression equation, contour graph, resistance-welding, filler materials, deformation, powder wire.

Постановка проблеми. Ступінь пластичного деформування при електроконтактному наплавленні визначає ширину наплавленого валика та товщину нанесеного шару покриття. Від нього залежать щільність отриманого порошкового шару, міцність зчеплення основного та присаджувального матеріалу. Визначення основних закономірностей пластичного деформування присаджувального матеріалу при електроконтактному наплавленні порошковим дротом методами математичної статистики, з урахуванням хімічного складу та фізико-механічних властивостей порошкового осердя, його початкової щільності, геометричних розмірів оболонки,

температури нагріву та зусилля на електродах з метою встановлення геометричних характеристик наплавленого шару.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У працях [1, 2] досліджується вплив умов пластичного деформування присаджувального матеріалу на зміни форми поперечного перерізу дроту й площини контактування дроту з металом основи в процесі електроконтактного наплавлення. Зокрема, в роботах [3, 4] наведено моделі формування з'єднання при електроконтактному наплавленні суцільним дротом та проведено розрахункове оцінювання впливу умов пластичного деформування на щільність активних центрів і міцність зчеплення покриття з основним металом.

Проте недостатньо вивченим є процес деформування порошкового дроту, який також може застосовуватися в якості присаджувального матеріалу при електроконтактному наплавленні, та вплив ступеня його пластичного деформування на щільність отриманого шару, міцність зчеплення, і, як наслідок, на техніко-експлуатаційні властивості покриття.

Мета роботи. Враховуючи велику кількість факторів, що впливають на процес деформування порошкового дроту при електроконтактному наплавленні, вибрати основні, а також побудувати статистичну модель процесу, яка дає можливість отримати якісні показники наплавленого шару. Необхідно отримати рівняння регресії, що дозволять оцінити вплив тих чи інших факторів на основні геометричні характеристики порошкового шару, а також дозволять прогнозувати поведінку присаджувального матеріалу в процесі наплавлення.

Результати досліджень. Для того, щоб отримати якісні закономірності пластичного деформування порошкового дроту в процесі наплавлення, необхідно з великої кількості факторів визначити основні.

На даний час немає можливості побудувати математичну модель, яка б охоплювала всі матеріали, що використовуються в якості присаджувальних при електроконтактному наплавленні. Тому було проведено дослідження з використанням найбільш вживаного в теперішній час матеріалу – сплаву ПГ-С1 [5]. В якості зносостійкої фази (наповнювача) використовували порошок вуглецевого ферохрому ФХ-800. Як було зазначено в роботі [6], при електроконтактному наплавленні порошковими дротами доцільно використовувати присаджувальні матеріали з початковою відносною щільністю осердя 60%, що пояснюється відсутністю в цьому випадку значного збільшення площини контактування між оболонкою дроту та деталлю на етапі попередньої холодної деформації. Автори робіт [2, 4] зазначають, що основними чинниками, які впливають на ступінь пластичної деформації при електроконтактному наплавленні є температура нагріву присаджувального матеріалу та питомий тиск на електродах контактної машини. Вони, в свою чергу, визначаються поєднанням основних параметрів режиму наплавлення: сили струму наплавлення – I_n , тривалістю імпульсу струму наплавлення – t_{im} і паузи між імпульсами – t_p , питомим тиском на ролик-електроді – P та швидкістю наплавлення – V_n . Завдяки тому, що електроконтактне наплавлення являє собою циклічний процес – за час імпульсу струму наплавляється одиничний об'єм металу покриття – для отримання якісних залежностей достатньо обмежитися трьома параметрами процесу: I_n , t_{im} , P . Крім того, необхідно дослідити вплив товщини оболонки порошкового дроту δ та відсотковий вміст наповнювача осердя на кінцеву ширину та висоту наплавленого валика.

Враховуючи досить велику кількість факторів, що впливають на ступінь пластичного деформування присаджувального матеріалу при електроконтактному наплавленні порошковим дротом, і, як наслідок, на геометричні розміри наплавленого валика для побудови математичного опису процесу застосовували повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^k як найпоширеніший, де фактори варіюються на двох рівнях [7]. Планування, проведення та опрацювання результатів ПФЕ складається з таких обов'язкових етапів: кодування факторів, складання план-матриці експерименту,

рандомізації дослідів, реалізації плану експерименту, перевірки відтворюваності дослідів, перевірки адекватності лінійної моделі, оцінювання значущості коефіцієнтів регресії.

З урахуванням зазначеного, в якості постійних величин приймаємо: діаметр оболонки порошкового дроту – $d = 5,0$ мм; початкову відносну щільність осердя – $P_0 = 60\%$; діаметр ролика-електрода – $D_{ел} = 300$ мм. Змінні фактори зводимо в матрицю планування експерименту (табл.1).

Таблиця 1

Матриця планування експерименту плану

Рівні	Фактори					Кодоване значення
	I, кА	$t_{ім}$, с	P, кН	δ , мм	ФХ800, %	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
Нижній	8,0	0,4	1,0	0,2	25,0	-1
Верхній	20,0	2,0	3,6	0,8	75,0	+1
Нульовий	14,0	1,2	2,3	0,5	50,0	0
Інтервал	6,0	0,8	1,3	0,3	25,0	

Реалізацію плану-матриці виконували за технологією, що описана в роботі [8]. Попередньо виготовляли присаджувальний матеріал у вигляді порошкового дроту та виконували електроконтактне наплавлення на машині для електричного шовного зварювання МШП-100-1. Виконували заміри ширини b і висоти h валика наплавленого металу та виконували розрахунок обтиснення ϵ_b і розширення ϵ_h за формулами:

$$\epsilon_b = \frac{b-d}{b}; \quad (1)$$

$$\epsilon_h = \frac{d-h}{d}, \quad (2)$$

де b – ширина валика наплавленого металу, мм;

h – висота валика наплавленого металу, мм;

d – діаметр порошкового дроту.

Математичне опрацювання отриманих результатів виконували в програмному середовищі системи Statistica_V6 (StatSoft) [9], яке дозволяє побудувати відповідну математичну модель, виконати перевірку відтворюваності дослідів, визначити коефіцієнти математичної регресії, виконати перевірку адекватності лінійної моделі та оцінювання значущості коефіцієнтів регресії отриманих рівнянь. Крім того, даний програмний продукт забезпечує графічну інтерпретацію отриманих результатів (рис.1–4).

У результаті математичного опрацювання отримано такі рівняння математичної регресії: для ширини b і висоти h валика наплавленого металу:

$$b = 4,648 + 0,037 \cdot I + 0,488 \cdot t - 0,133 \cdot P - 0,286 \cdot \delta + 0,023 \cdot \%FeCr + 0,027 \cdot I \cdot t - 0,002 \cdot I \cdot P - 0,003 \cdot I \cdot \delta - 0,0002 \cdot I \cdot \%FeCr + 0,048 \cdot t \cdot P - 0,026 \cdot t \cdot \delta - 0,005 \cdot t \cdot \%FeCr + 0,032 \cdot P \cdot \delta - 0,0006 \cdot P \cdot \%FeCr \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 h = & 5,432 - 0,012 \cdot I - 0,661 \cdot t + 0,118 \cdot P - 0,108 \cdot \delta - 0,023 \cdot \%FeCr - 0,019 \cdot I \cdot t - \\
 & - 0,003 \cdot I \cdot P + 0,0035 \cdot I \cdot \delta - 0,00013 \cdot I \cdot \%FeCr - 0,042 \cdot t \cdot P + 0,069 \cdot t \cdot \%FeCr + \\
 & + 0,08 \cdot P \cdot \delta + 0,00096 \cdot P \cdot \%FeCr + 0,0017 \cdot \delta \cdot \%FeCr
 \end{aligned} \quad (4)$$

Графічні залежності ширини валика (b) і висоту валика (h) наплавленого металу від параметрів режиму електроконтактного наплавлення наведено на рис.1 та 2 відповідно.

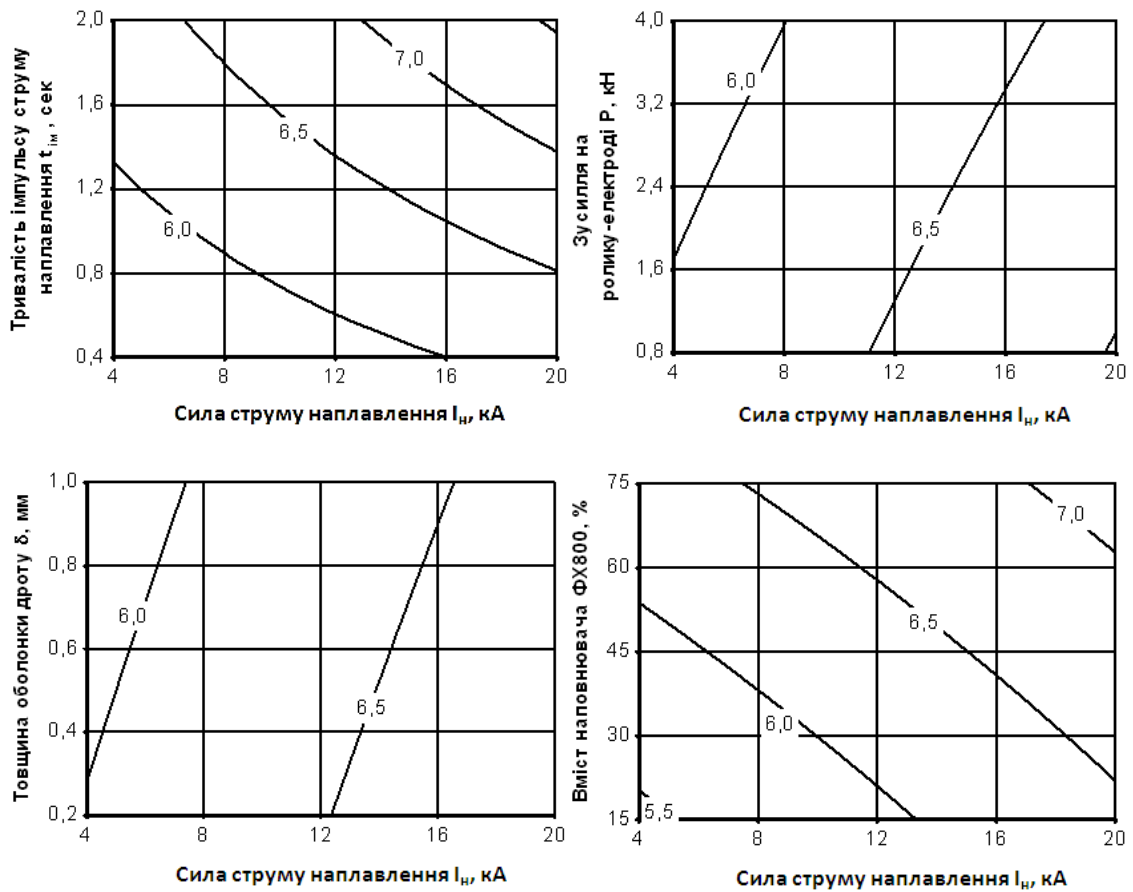


Рисунок 1. Залежність ширини валика (b) наплавленого металу від параметрів режиму електроконтактного наплавлення

Figure 1. Dependence of the width (b) of the fused metal roller on the resistance fusing parameters regime

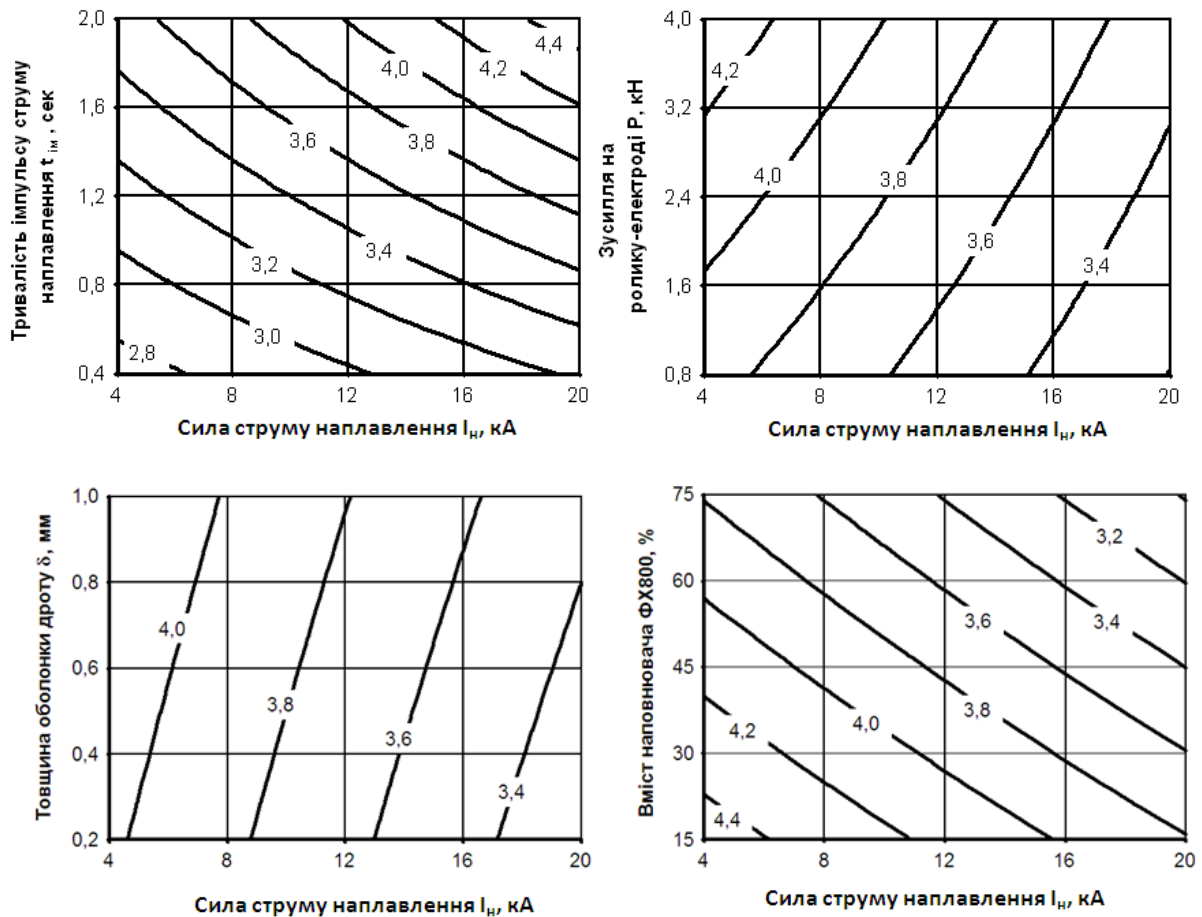


Рисунок 2. Залежність висоти валика (h) наплавленого металу від параметрів режиму електроконтактного наплавлення

Figure 2. Dependence of the height (h) of the fused metal roller on the resistance fusing parameters regime

За результатами математичного опрацювання отримано також рівняння математичної регресії обтискання ε_b і розширення ε_h наплавленого металу.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_b = & -0,126 + 0,009 \cdot I + 0,1114 \cdot t - 0,0184 \cdot P - 0,0213 \cdot \delta + 0,00499 \cdot \%FeCr + \\
 & + 0,0052 \cdot I \cdot t - 0,00048 \cdot I \cdot P - 0,0014 \cdot I \cdot \delta + 0,00004 \cdot I \cdot \%FeCr + 0,0084 \cdot t \cdot P - \\
 & - 0,0104 \cdot t \cdot \delta - 0,00106 \cdot t \cdot \%FeCr + 0,0032 \cdot P \cdot \delta - 0,00015 \cdot P \cdot \%FeCr - \\
 & - 0,00017 \cdot \delta \cdot \%FeCr
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_h = & -0,086 + 0,0023 \cdot I + 0,132 \cdot t - 0,0236 \cdot P + 0,0216 \cdot \delta + 0,0045 \cdot \%FeCr + \\
 & + 0,0039 \cdot I \cdot t + 0,00064 \cdot I \cdot P - 0,00069 \cdot I \cdot \delta + 0,000025 \cdot I \cdot \%FeCr + 0,0084 \cdot t \cdot P \\
 & - 0,0014 \cdot t \cdot \%FeCr - 0,016 \cdot P \cdot \delta - 0,00019 \cdot P \cdot \%FeCr - 0,0003 \cdot \delta \\
 & \cdot \%FeCr
 \end{aligned} \quad (6)$$

Графічні залежності ступеня пластичного деформування ε_b та ε_h від параметрів режиму електроконтактного наплавлення представлено на рис.3 і 4.

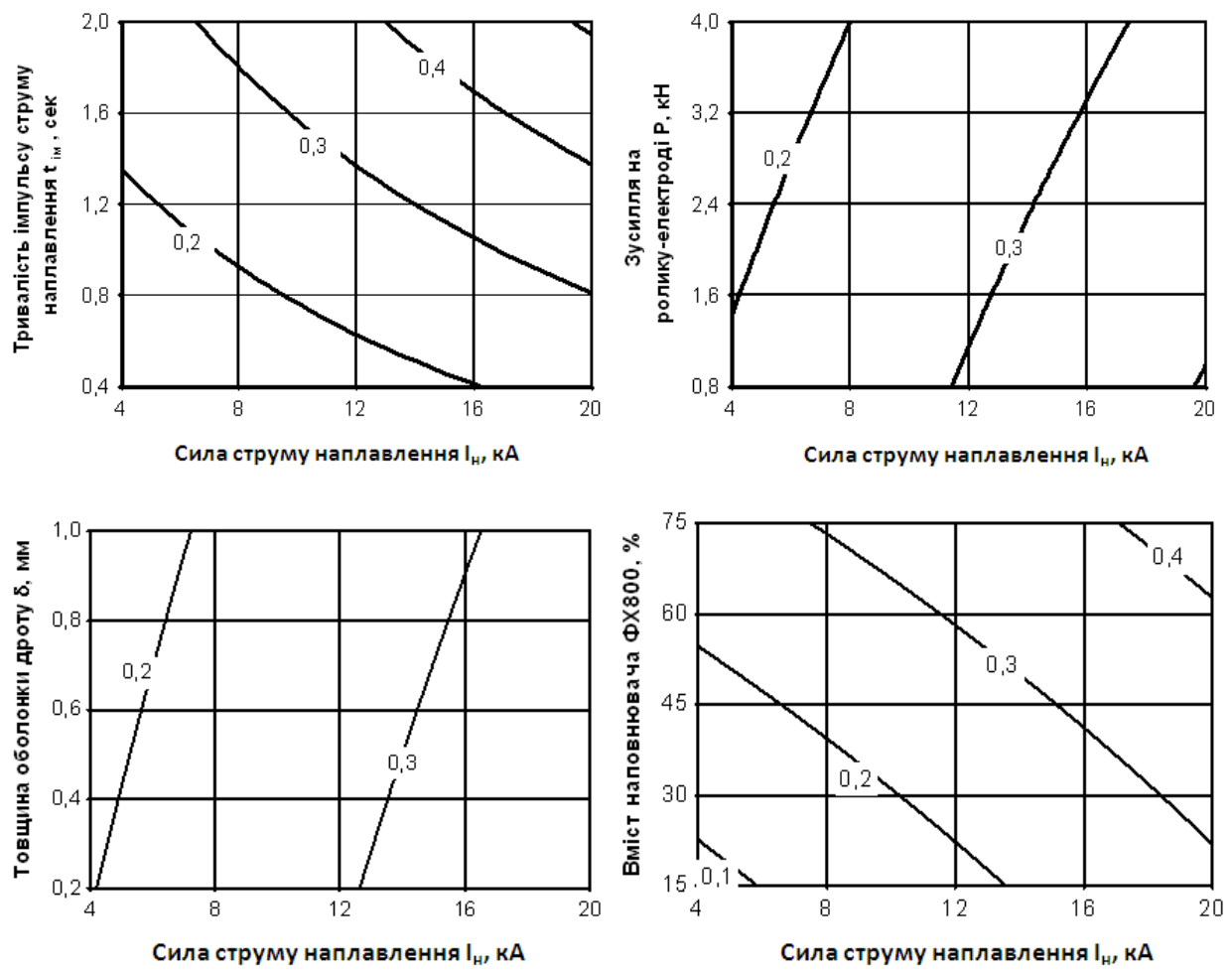


Рисунок 3. Залежність ступеня пластичного деформування (ϵ_b) від параметрів режиму електроконтактного наплавлення

Figure 3. Dependence of the degree of plastic deformation (ϵ_b) on the resistance fusing parameters regime

Із аналізу коефіцієнтів рівнянь (3–6) можна зробити висновок, що найбільший вплив на ступінь пластичного деформування присаджувального матеріалу при електроконтактному напавленні порошковим дротом здійснює сила і час протікання імпульсу електричного струму наплавлення, а також хімічний склад осердя порошкового дроту.

Графічні залежності, представлені на рис.1–4, показують, що при збільшенні сили струму і часу протікання імпульсу струму наплавлення ступінь пластичного деформування присаджувального матеріалу збільшується. Це можна пояснити підвищенням температури нагріву присаджувального порошкового дроту. З цього приводу можна зробити висновок, що особливості пластичного деформування присаджувального дроту пояснюються різною температурою його нагрівання. З графічних залежностей бачимо, що зі збільшенням товщини оболонки присаджувального матеріалу ступінь деформування порошкового дроту знижується. Це явище важко пояснити змінами жорсткості оболонки, тому що при нагріванні до температури $(0,8...0,9)T_{пл}$ [8] у даному інтервалі зміни товщини оболонки δ опір пластичного деформування змінюється незначно.

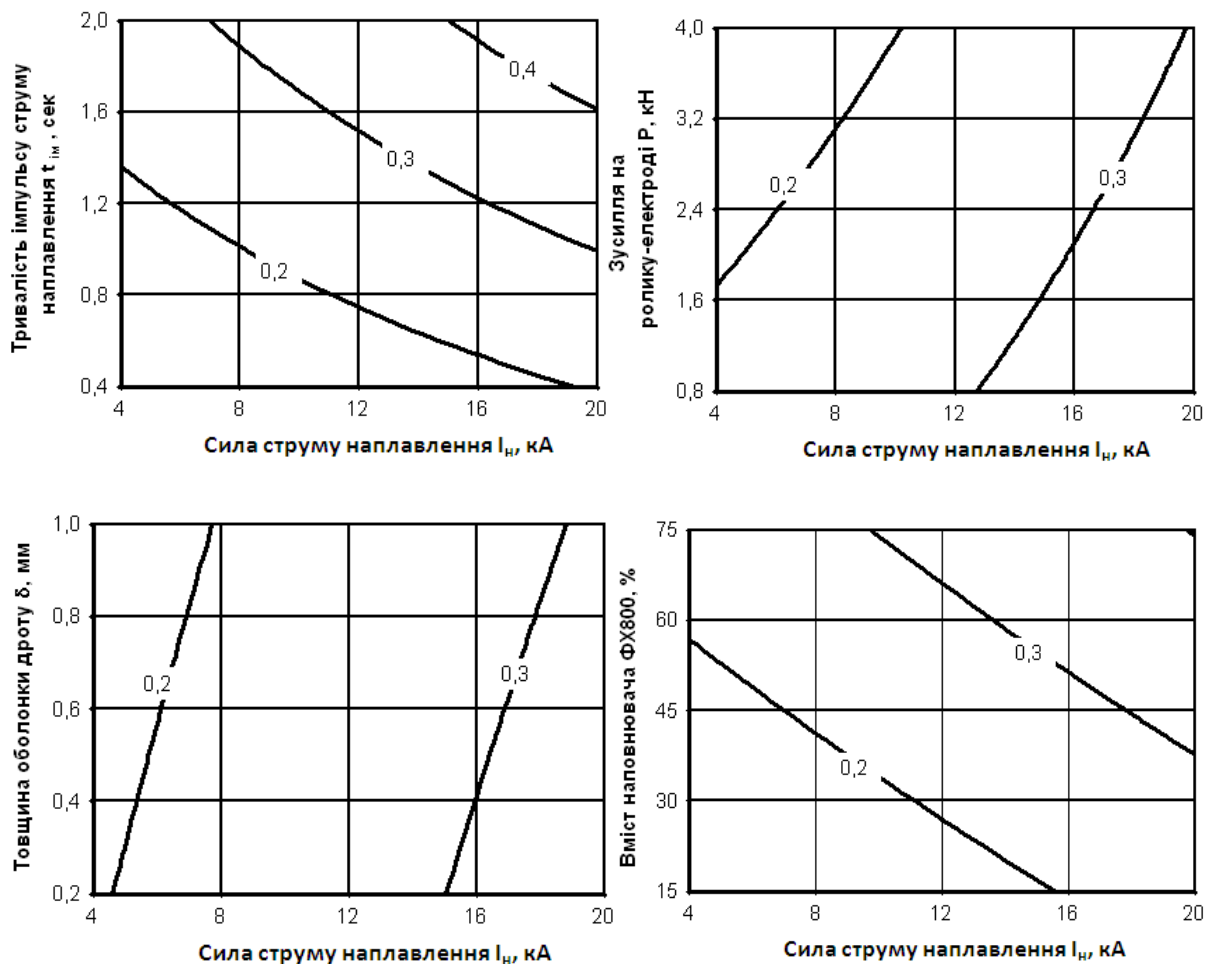


Рисунок 4. Залежність ступеня пластичного деформування (ϵ_h) від параметрів режиму електроконтактного наплавлення

Figure 4. Dependence of the degree of plastic deformation (ϵ_h) on the resistance fusing parameters regime

Однак при збільшенні δ зменшується електричний опір оболонки, і, як наслідок, зменшується кількість теплоти, що виділяється за час протікання імпульсу електричного струму. Зменшення температури нагрівання буде призводити до зниження ступеня пластичного деформування.

На основі цього припущення можна пояснити залежності впливу хімічного складу осердя на ступінь пластичного деформування. З графічних залежностей бачимо, що при збільшенні кількості ферохрому ФХ800 у порошковому осерді дроту ступінь деформації збільшується. Ферохром ФХ800 має досить високий електричний опір, більший ніж сплав ПГ-С1. Тому збільшення кількості ферохрому призводить до додаткового тепловиділення в порошковому шарі дроту. Збільшення температури нагрівання присаджувального матеріалу призводить до збільшення ступеня пластичного деформування.

Висновки. Побудовано статистичну модель процесу пластичного деформування присаджувального матеріалу у вигляді порошкового дроту при електроконтактному напавленні. Встановлено, що ступінь пластичного деформування присаджувального матеріалу залежить від поєднання основних параметрів режиму електроконтактного напавлення. При збільшенні сили та часу протікання імпульсу електричного струму напавлення, а також електричного опору порошкового наповнювача осердя порошкового дроту ступінь деформування збільшується. Збільшення товщини

оболонки порошкового дроту та зусилля на ролику-електроді в зазначених межах призводити до зниження ступеня пластичного деформування присаджувального матеріалу при електроконтактному наплавленні.

Conclusions. Statistical model of the process of plastic deformation of the filler material in the form of cored wire under electric surfacing was developed. It was established that the degree of plastic deformation of filler material depends on the combination of the main parameters of the regime of the electro contact surfacing. Thus, by increasing the strength and time of electrical welding current impulse flow, as well as the electrical resistance of powder filler of powder cored wire core, the deformation degree increases. Increasing of the thickness of the cored wire shell and efforts on roller-electrode in the indicated limits leads to the reduction of plastic deformation of filler material during electric contact surfacing.

Список використаної літератури

1. Расчет геометрических размеров контакта между присадочной проволокой и электродом при электроконтактной наплавке [Текст] / Л.Н. Соколов, В.Т. Катренко, В.А. Пресняков и др. // Сварочное производство. – 1987. – № 10. – С.43–44.
2. Dubrovskii, V.A. Variation of the shape of the cross section of filler wire in electric resistance welding / V.A. Dubrovskii, V.V. Bulychev, I.N. Zybin. // Welding International. – 2001. – 15 (11). – P.891–894.
3. Нафиков, М.З. Математическая модель формирования соединения при электроконтактной наплавке (наварке) проволоки [Текст] / М.З. Нафиков, И.И. Загиров // Технология машиностроения. – 2008. – №6. – С.62–66.
4. Булычев, В.В. Особенности пластической деформации при получении покрытий электроконтактной приваркой [Текст] / В.В. Булычев, Р.А. Латыпов // Международный научный журнал. – 2010. – №5. – С.78–85.
5. Ярошевич, В.К. Электроконтактное упрочнение [Текст] / В.К. Ярошевич, Я.С. Генкин, В.А. Верещагин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 256 с.
6. Волков, Д.А. Влияние физико-технологических характеристик порошковых материалов на их уплотняемость в оболочке при электроконтактной наплавке [Текст] / Д.А. Волков, В.Т. Катренко, В.А. Пресняков // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: зб. наук. праць КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 4/2004 (27). – С 100–102.
7. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов [Текст] / В.С. Зарубин; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.
8. Волков, Д.А. Электроконтактная наплавка рабочего слоя почвообрабатывающих орудий с регламентированным распределением свойств [Текст] / Д.А. Волков, В.Т. Катренко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – Вип. 2(4). – С.96–101.
9. Боровиков, В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В.П. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.

Отримано 20.12.2013