

Машинобудування і зварювальне виробництво

The mechanism for increasing corrosion resistance, crack resistance and wear resistance during high-speed low-energy surfacing with corrosion-resistant wire consists of ensuring the austenite structure, increasing the surfacing speed, forming a homogeneous fine-dispersed microstructure, and reducing heat input, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, increased crystallization rate, the microstructure refinement, interatomic distances reduction and interatomic bonds growth.

A high-speed low-energy of galvanizing unit immersion drums with corrosion-resistant chromium-nickel wire Sv08Kh21N10G6 surfacing process has been developed, which provides an austenitic structure, a homogeneous fine-grained microstructure, heat input, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, interatomic distances reduction, interatomic bonds, corrosion resistance and wear resistance drums more than 4 times increase, zinc consumption, the galvanizing process material intensity and galvanized sheet cost price reduction.

Keywords: *The galvanizing unit immersion drum, high-speed low-energy corrosion-resistant chromium-nickel metal, an austenitic structure, homogeneous fine-grained microstructure, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, interatomic distances, interatomic bonds, corrosion resistance and wear resistance.*

Стаття надійшла 12.05.2025 р.

УДК 004.056.53:519.17

doi.org/10.31498/2522-9990292025330211

Щетинін С.В., Десятський С.П.

КЕРУВАННЯ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ

Збільшення виробництва труб зумовлено швидким розвитком трубопровідного транспортування газоподібних, рідких та сипких середовищ, подальшим розвитком містобудування та різних галузей машинобудування.

Широке використання труб обумовлено можливістю транспортування по них різних продуктів і високими механічними властивостями труб, які при порівняно невеликій масі мають значний запас міцності і великий опір вигину і скручування.

Найбільший попит на світовому ринку мають труби для магістральних газо- і нафтопроводів, які експлуатуються при коливаннях температури (від -40 до +50°C) і виготовляються з вуглецевих і низьколегованих сталей.

Україна економічно зацікавлена у транспортуванні газу та нафти через свою територію та будівництво трубопроводів. Тому доцільно розробляти нові способи зварювання труб, що забезпечують підвищення продуктивності, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, зниження енергоємності, матеріаломісткості та собівартості труб.

В даний час якісне формування зварних швів при односторонньому зварюванні забезпечується за рахунок утримання рідкого металу зварювальної ванни спеціальними підкладками, флюсами, мідними та мідно-флюсовими подушками, поперечним магнітним полем.

При зварюванні труб, за розробленим способом, збільшується площа, якою обертається активна пляма, зменшується в 4 рази тиск дуги, що забезпечує при односторонньому високошвидкісному зварюванні якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику.

Встановлено закономірність розподілу магнітного поля зварювального струму у зварювальній ванні, пластинах та трубах. При протіканні струму пластинами індукція на середині товщини металу дорівнює нулю і зростає при наближенні до поверхні. Максимальне

Машинобудування і зварювальне виробництво

значення індукції розміщується на поверхні. При переході від верхньої до нижньої поверхні індукція змінює напрямок протилежне.

Ключові слова: магнітне дуття, індукція магнітного поля, відносна магнітна проникність феромагнетика, феромагнітна труба.

Постановка проблеми. При односторонньому високошвидкісному зварюванні якість формування швів визначається стабільністю процесу, що знижується при магнітному дутті. Замкнений контур труб посилює магнітне дуття, внаслідок чого порушується стабільність процесу формування швів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Магнітне поле, при протіканні струму провідником, досліджено на високому науковому рівні Р.М. Уайтом, Г.П. Абрамовичем, Г.Є. Зільберманом [1-3]. Високошвидкісне зварювання забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань. Однак, підвищення швидкості зварювання обмежено порушенням формування швів в результаті утворення підрізів та магнітним дуттям.

Підрізи обмежують підвищення швидкості зварювання і досліджені в достатній мірі. Природа утворення підрізів фундаментально вивчена Б.Є. Патоном, В.К. Лебедевим, І.В. Пентеговим, С.Л. Мандельбергом. Одні вважають, що підрізи утворюються внаслідок збільшення поверхневого натягу, інші внаслідок відхилення дуги назад, треті, в результаті підвищення тиску дуги. Однак, природа утворення підрізів та вплив магнітного поля зварювального струму на магнітне дуття, при високошвидкісному зварюванні, повністю не встановлені.

Мета дослідження. Розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує запобігання магнітному дуттю та підвищення стабільності процесу якості зварних з'єднань, за рахунок керування магнітним полем зварювального струму.

Основний матеріал дослідження. Однією з гострих проблем при зварюванні є магнітне дуття. Особливо посилюється магнітне дуття при зварюванні труб [4–8], внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феромагнітній трубі.

Під дією електромагнітної сили, дуга відхиляється у бік поля меншої напруженості, до природного розриву (рис.1), отже дугу неможливо закрити флюсом. При цьому, напруга зростає, струм падає. Електрод подається, закорочує на виріб, і знову збуджується дуга. При закорочуванні на виріб струм зростає, знижується напруга.

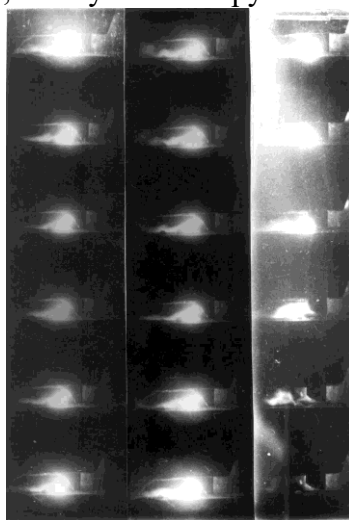


Рисунок 1 – Кінограма нахилу дуги назад, аж до розриву, під дією електромагнітної сили при високошвидкісному зварюванні складовим електродом

в аргоні: $I = 2300 - 2400$ А; $U = 23 - 24$ В

Інтервал між кадрами $6 \cdot 10^{-4}$ с; напрямок зварювання – зліва направо

Машинобудування і зварювальне виробництво

Процес періодично повторюється, формування швів порушується. Посилення магнітного дуття при зварюванні труб загально відоме, проте магнітне поле при зварюванні труб досліджено недостатньо.

Вимірювання магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі утруднено високою температурою, тому, при наближенні до дуги та зварювальної ванни, на відстань менше 0,016 м, ізолюваний кварцом зонд вимірювача магнітної індукції згоряє. У зв'язку з цим, доцільно дослідити розподіл магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі розрахунковим шляхом. При розрахунку індукції магнітного поля для прямолінійного провідника, зі струмом малого перерізу нескінченної довжини

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

[3] вплив форми провідника на поле не враховується. При зварюванні, струм протікає по провідникам великих перерізів, форма яких впливає на індукцію магнітного поля, тому розроблені математичні моделі магнітного поля струму в пластинах і трубах.

Розрахунок магнітного поля струму, що протікає по виробу, виконується на основі закону Біо-Савара-Лапласа і принципу суперпозиції магнітних полів [3]. Для визначення магнітного поля в зазорі пластин (без урахування крайових ефектів), розіб'ємо їх на нескінченно довгі тонкі провідники перетином $dx dy$.

Індукція магнітного поля, що створений елементом нескінченно довгого провідника струму, що протікає через майданчик, з координатами x, y перетином $dx dy$, у точці (x_0, y_0) (рис.2а):

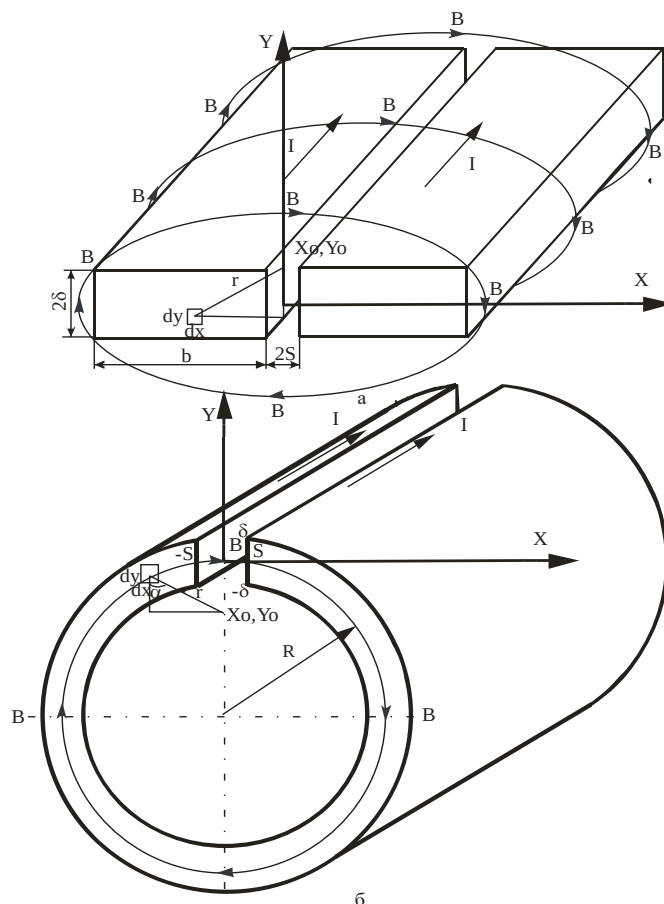


Рисунок 2 – Розрахункова схема магнітного поля зварювального струму, що протікає по пластинах (а) та трубі (б)

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Idxdy}{2\pi\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} 4\delta b, \quad T, \quad (1)$$

де, μ – відносна магнітна проникність феромагнетика; μ_0 – магнітна постійна, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I – струм, що протікає по двох пластинах, А; δ – половина товщини пластин, м; b – ширина пластини, м.

Індукція магнітного поля

$$dB = \sqrt{dB_x^2 + dB_y^2}, \quad T, \quad (2)$$

де, dB_x – поперечна складова, $dB_x = dB \frac{y-y_0}{r}$, T ; dB_y – поздовжня складова,

$dB_y = dB \frac{x-x_0}{r}$, T ; r – відстань від елемента струму, м.

Індукція поперечного магнітного поля

$$dB_x = \mu\mu_0 \frac{I(y-y_0)dxdy}{8\pi\delta b[(\delta-\delta_0)^2 + (y_0-y)^2]}, \quad T. \quad (3)$$

Індукція поздовжнього магнітного поля

$$dB_y = \mu\mu_0 \frac{I(x-x_0)dxdy}{8\pi\delta b[(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2]}, \quad T. \quad (4)$$

Індукція поперечного та поздовжнього магнітних полів у точці x_0, y_0 , відповідно, визначається інтегруванням виразів (3) та (4):

$$B_x = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-b-s}^{-s} \frac{(y-y_0)dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(y-y_0)dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} \right) dx, \quad T; \quad (5)$$

$$B_y = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-b-s}^{-s} \frac{(x-x_0)dx}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(x-x_0)dx}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} \right) dy, \quad T. \quad (6)$$

Індукцію розраховували на персональному комп'ютері. Розрахункові значення добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими при моделюванні процесу (рис.3) і вимірюванні магнітної індукції в зазорі стику, по всій товщині і на відстані від виробу, тесламетром ЕМ4305. Для адекватності моделі реальним умовам, вимірювання індукції виконували, при пропусканні по виробу струму 2100 А, характерного для зварювання складовим електродом. Як джерело живлення використовували зварювальний випрямляч ВМГ-5000.

В результаті розрахунку залежності $B_x(y)$ при $x=0$ і проведених досліджень, встановлено, що при протіканні струму пластинами індукція в середині товщини пластини дорівнює нулю, внаслідок взаємного знищення полів рівної величини протилежних напрямків, згідно з принципом суперпозиції.

При наближенні до поверхні пластини, відстань від її іншої поверхні збільшується, компенсуюча дія полів зменшується і величина індукції магнітного поля зростає, Максимальне значення індукції досягається на поверхні (рис.3). Це свідчить про те, що

Машинобудування і зварювальне виробництво

максимальні електромагнітні сили міжatomної взаємодії визначають міцність зварного з'єднання.

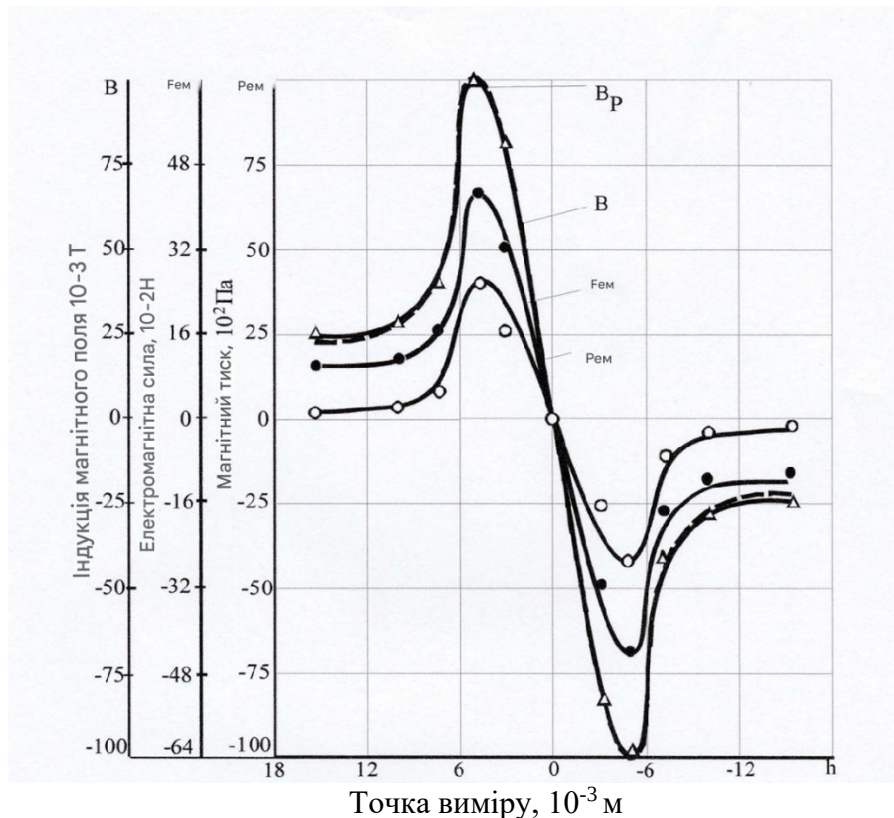


Рисунок 3 – Закономірність розподілу магнітного поля, при протіканні струму пластинами: струм 2100 А, зазор у стику $2 \cdot 10^{-3}$ м; пластини $(10 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; B_p - розрахункове значення індукції

При віддаленні від поверхні пластини, індукція поля спочатку різко зменшується, внаслідок низької магнітної проникності повітря, а потім змінюється незначно. Відповідно до напрямку силових ліній магнітного поля, при переході від середини до нижньої поверхні пластин, напрямок індукції змінюється на протилежне.

Адекватність математичної моделі для пластин підтверджена гарною східністю розрахункових і експериментальних даних індукції магнітного поля.

Відомо, що при протіканні струму трубою без зазору, магнітне поле всередині неї дорівнює нулю. Зварювання труб виробляють із зазором у стику, що впливає на магнітне поле зварювального струму.

Розрахункові формули для визначення закономірності розподілу індукції в зазорі стику труби отримані на підставі наступних припущень: оскільки, при зварюванні товстостінних труб їх товщина 2δ більша за зазор у стику $2S$ (рис.2б), можна вважати, що деформація силових ліній магнітного поля відсутня. Отже, індукції у трубі та зазорі на кордоні феромагнетик-повітря рівні.

Тоді, індукція магнітного поля в зазорі стику визначається за теоремою о циркуляції[3],

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{B}{\mu_0 \mu} l_{\text{ж}} + \frac{B}{\mu_0} l_B = \sum I_{\text{ЕЛ}} \quad (7)$$

де, $l_{\text{ж}}$ – довжина феромагнетика, $l_{\text{ж}} = 2\pi R - 2S$, м; l_B – зазор в стику, $l_B = 2S$, м;

R – радіус труби, м; $I_{\text{ЕЛ}}$ – значення елементарного струму, що тече трубою, А.

Сума елементарних струмів, що протікають усередині контуру, що охоплюється колом з центром, що лежить на осі труби і проходить через точку $(0, y)$,

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\sum I_{эл} = \frac{I}{2\delta}(\delta + y), A, \quad (8)$$

де, 2δ – товщина стінки труби, м; y – ордината, $-\delta \leq y \leq \delta$, м.

Тоді, індукція магнітного поля в зазорі стику труби

$$B = \frac{\mu_0 \sum I_{эл}}{\frac{l_m}{\mu} + l_e} = \frac{\mu_0 \frac{I}{2\delta}(\delta + y)}{\frac{2\pi R - 2S}{\mu} + 2S}, T. \quad (9)$$

Після перетворень:

$$B = \frac{\mu_0 I (\delta + y)}{4\delta \left(\frac{\pi R - S}{\mu} + S \right)}, T. \quad (10)$$

За допомогою рівняння(10), можна розрахунковим шляхом визначити індукцію магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі при різних зазорах, рівних ширині ізотерми Кюрі, режимі зварювання та струмопідведення до виробу. Достовірність математичної моделі(10) підтверджена при моделюванні процесу, шляхом пропускання струму по трубі і вимірювання індукції в зазорі стику по товщині металу та на відстані від поверхні труби. Адекватність моделі реальним умовам підтверджена у виробничих умовах, при зварюванні труб діаметром 0,426 м для газо- та нафтопровідних магістралей.

Встановлено, що при протіканні струму трубою, максимальне значення індукції зростає до 0,35 Т (рис.4), порівняно з 0,1 Т при протіканні струму по пластинах (рис.3).

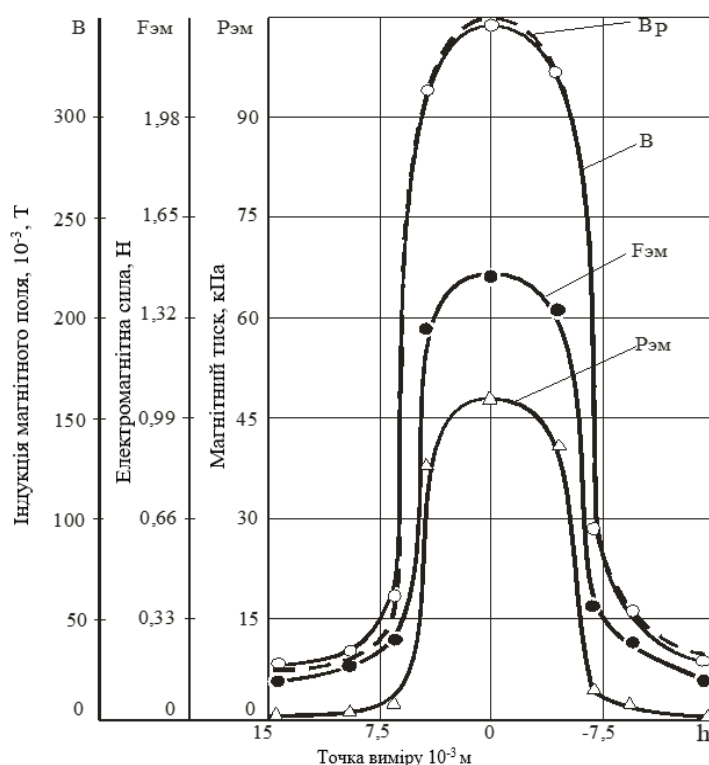


Рисунок 4 – Закономірність розподілу індукції магнітного поля при протіканні струму трубою: величина струму 2100 А; зазор в стику $2 \cdot 10^{-3}$ м;

труба $(10 \times 60 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; B_p – розрахункове значення індукції, з урахуванням залежності магнітної проникності від напруженості поля

Експериментально встановлено, що відносна магнітна проникність феромагнітної труби μ залежить від напруженості магнітного поля H (рис.5а). При малих значеннях, зі збільшенням H , різко зростає до 1300.

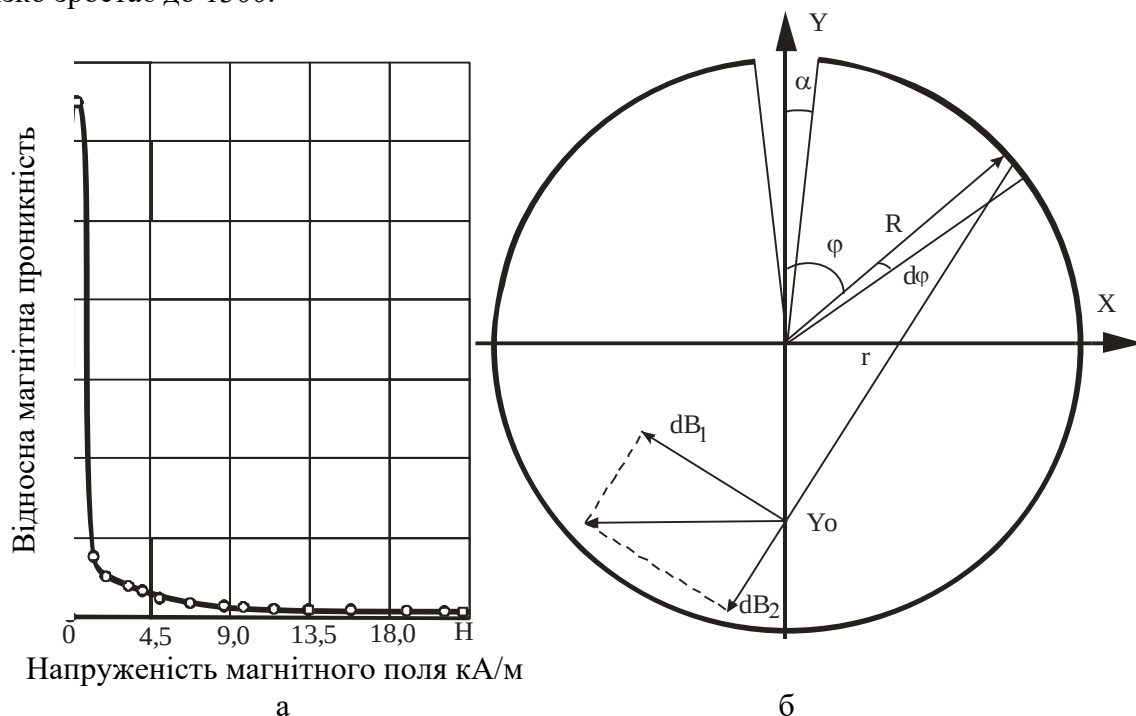


Рисунок 5 – Залежність відносної магнітної проникності феромагнетика від напруженості магнітного поля (а) та розрахункова схема індукції магнітного поля в тонкостінній трубі (б)

Потім, при збільшенні H , значення μ феромагнетика спочатку різко зменшуються до 158, а потім менш значно до 10. Без урахування залежності від H , згідно з розрахунковими даними, максимальна індукція – на поверхні труби. На внутрішній поверхні стінки труби індукція дорівнює нулю. З урахуванням залежності μ від H , максимальна індукція – в середині стінки труби, що добре узгоджується з експериментальними даними.

Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що при протіканні струму трубою, максимальне значення індукції різко зростає в π разів, порівняно зі зварюванням пластин:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}, T. \quad (11)$$

При цьому, напрямок індукції в стику не змінюється, а максимальне значення досягається в середині стінки труби.

Індукція підвищується, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в замкнутій, що має більшу магнітну проникність феромагнітній трубі, контур якої збігається з силовими лініями поля. За межами феромагнітної труби магнітна проникність знижується, і індукція різко падає. Індукція на осі труби дорівнює нулю і має протилежний напрямок в області нижньої стінки.

Форма виробу, відповідно, впливає на електромагнітну силу $F_{EM} = IBL_D$ [3], яка підвищується з 0,42 Н, при протіканні току по пластинах, до 1,47 Н і магнітний тиск $P_{EM} = B^2/2\mu_0$, Па [2], який, при протіканні струму по трубі, зростає з 3,98 кПа до 48,8 кПа, більш ніж у 10 разів. Тому, при зварюванні труб посилюється магнітне дуття та вплив магнітного поля на формування швів. В результаті магнітного дуття, при зварюванні труб від

Машинобудування і зварювальне виробництво

струмопідведення, електромагнітна сила відхиляє дугу вперед, до обриву дуги, режим стає нестабільним, формування швів порушується.

При зварюванні на струмопідвід, дуга відхиляється назад, занурюється в основний метал і стабілізується, але шов формується з підрізами.

Для тонкостінної труби індукцію магнітного поля, що створене струмом провідності всередині труби (рис.5б), визначали згідно з принципом суперпозиції полів, що створені нескінченно довгими прямолінійними провідниками, якими протікають струми

$$dI = \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)}, A, \quad (12)$$

де, φ – кут, що визначає положення елементарної ділянки зі струмом, *рад*;

α – кут, що залежить від величини зазору в стику, *рад*.

Симетричні, щодо осі Y , струми I створюють у точці y_0 сумарне поле, спрямоване вздовж осі X , величиною

$$dB = 2\mu\mu_0 \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)} \frac{1}{2\pi r} \frac{y - y_0}{r}, T, \quad (13)$$

де, r – відстань від елементарного струму до точки $(0, y_0)$, рівне $\sqrt{(y_0 - y)^2 + x^2}$, м;

y – ордината елементарної ділянки зі струмом, м; y_0 – ордината точки, в якій вимірюється індукція, м.

Перейшовши до полярних координат, отримаємо

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Id\varphi}{\pi - \alpha} \frac{1}{2\pi} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 \sin^2\varphi + (y_0 - R\cos\varphi)^2} = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi, T, \quad (14)$$

де, $x = R\sin\varphi, y = R\cos\varphi$, м.

Індукцію магнітного поля струму, що протікає по трубі, визначали інтегруванням:

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi = \\ &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{1}{2y_0} \frac{2y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi + R^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi = \\ &= \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \int_{\alpha}^{\pi} \left(1 + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} \right) d\varphi = \quad , T. \quad (15) \\ &= \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left(\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{d\varphi}{1 - \frac{2Ry_0}{R^2 + y_0^2} \cos\varphi} \right) \end{aligned}$$

Так як $\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi = \pi - \alpha$, після інтегрування та перетворень маємо:

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$B(0, y_0) = \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[\pi - \alpha + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 - y_0^2} \left(\pi - 2\arctg \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \tg \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (16)$$

Усереднені труби, при $y_0 \leq R$ індукція магнітного поля

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[-\alpha + 2\arctg \left(\frac{R^2 - y_0^2}{R - y_0^2} \tg \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (17)$$

За межами труби індукція магнітного поля

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[\pi - \alpha + \left(\pi - 2\arctg \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \tg \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (18)$$

Індукція магнітного поля на значній відстані від труби, при $y_0 \gg R$

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[2\pi - \alpha - 2\arctg \left(-\frac{y_0^2}{y_0^2} \tg \frac{\alpha}{2} \right) \right] = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} 2\pi = \mu_0 \frac{I}{2(\pi - \alpha)y_0} \quad (19)$$

Нехтуючи, у зв'язку з малим значенням, величиною α , отримаємо індукцію магнітного поля на значній відстані від труби

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{2\pi y_0}, T, \quad (20)$$

що є класичним виразом для прямолінійного провідника зі струмом і підтверджує достовірність отриманої формули.

З виразу (17) на осі труби, при $y_0 = 0$, індукція

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I \sin \alpha}{2\pi R(\pi - \alpha)}, T. \quad (21)$$

Згідно з виразом (21), при протіканні струму по трубі із зазором, індукція магнітного поля на осі труби не дорівнює нулю та зростає зі збільшенням зазору.

Вірогідність отриманих математичних моделей підтверджена гарною збіжністю з експериментальними даними.

Зварювання труб для газо- та нафтопровідних магістралей проводиться на мідній підкладці або флюсовій подушці, розташованій у штанзі, на яку вдягається труба. Масивна феромагнітна штанга, виготовлена зі швелерів з'єднаних листом, виконує функції несучої конструкції та струмопровідного елемента, яким тече зварювальний струм.

Для регулювання магнітного поля, при зварюванні труб, отримано рівняння індукції в трубі, при розташуванні всередині струмопровідного кабелю. На підставі принципу суперпозиції, індукція магнітного поля при протіканні струму всередині труби:

$$B = B_1 + B_2, T, \quad (22)$$

де, B_1 – індукція магнітного поля струму, що тече трубою, T ;

B_2 – індукція магнітного поля струму всередині труби, T .

Згідно з виразом (10), індукція магнітного поля струму, що тече трубою:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I (\delta + y)}{4\delta \left(\frac{\pi R - S}{\mu} + S \right)}, T.$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

Індукція магнітного поля струму всередині труби, в зазорі :

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}, T. \quad (23)$$

Тоді, індукція магнітного поля струму, що протікає по трубі і струмопровідному кабелю всередині труби, у зазорі стику виразиться рівнянням:

$$B = \mu_0 \frac{I}{8\pi^2 R \delta} \frac{2(\delta + y_0)\pi}{\left(\frac{S}{\pi R} + \frac{1}{\mu}\right)} + \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r}, T, \quad (24)$$

де, I – величина струму, що тече трубою, A ; I_1 – величина струму, що тече всередині труби, A ; r – поточний радіус труби, m ; R – середній радіус труби, m .

За межами труби, зі струмом всередині, при $r \geq R_2$, де R_2 – зовнішній радіус труби, m , індукція магнітного поля:

$$B = \mu_0 \frac{I + I_1}{2\pi r}, T.$$

При віддаленні від струму всередині труби індукція магнітного поля зростає, внаслідок концентрації силових ліній у феромагнітній трубі. В результаті, індукція максимальна на внутрішній поверхні труби і зменшується до центру труби до нуля.

Закономірність розподілу індукції в трубі, зі струмом усередині труби, така ж, як для тіла суцільного перерізу, з протилежним напрямом силових ліній магнітного поля на верхній та нижній поверхнях. Тому, індукція магнітного поля зі струмом усередині труби, при $r \leq R_1$:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_1 r}{R_1^2} + \frac{I}{y_0} \right), T, \quad (25)$$

де, R_1 – внутрішній радіус труб, m .

Адекватність моделі реальним умовам зварювання труб підтверджено при зварюванні у виробничих умовах та моделюванні процесу.

Індукція, електромагнітна сила і магнітний тиск значно посилюються при протіканні всередині струму, напрям якого збігається з напрямком струму в трубі.

Максимальне значення індукції магнітного поля зміщується із середини до нижньої поверхні та зростає, з 0,35 Т до 0,55 Т.

Розрахункове значення індукції магнітного поля струму всередині труби, розташоване на внутрішній поверхні труби, $B=0,595$ Т, що добре узгоджується з експериментальними даними, отриманими при моделюванні.

Магнітне поле визначається струмом усередині труби. Пропорційно індукції, при протіканні всередині труби струму, напрям якого збігається зі струмом у трубі, електромагнітна сила зростає з 1,47 Н до 2,31 Н і магнітний тиск - з 49 кПа до 120 кПа.

При протіканні всередині труби струму, протилежного напрямку струму в трубі, напрям індукції змінюється на протилежне і максимум індукції - 0,375 Т зміщується до внутрішньої поверхні труби, що підтверджує домінуючу роль магнітного поля струму, що протікає всередині труби.

При цьому, створюються, з максимумом на нижній поверхні стінки труби, спрямовані вгору електромагнітна сила – 1,575 Н та магнітний тиск – 56 кПа, який при масі ванни 0,101 кг може утримувати рідкий метал від витікання з ванни при односторонньому зварюванні, що забезпечує якісне формування зворотного валика на флюсовій подушці.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Для запобігання магнітного дуття, підвищення стабільності процесу та якості зварних з'єднань на флюсовій подушці, розроблений спосіб електродугового одностороннього зварювання труб [9] (рис.6) від струмопідводу, з розташованою всередині, в безпосередньому контакті, феромагнітною трубою, при якому всередині феромагнітної труби пропускають струм, напрямок якого протилежний напрямку зварювального струму, а величину встановлюють залежно від величини зварювального струму, згідно з виразом: $I = (0,5 \div 0,6)I_1$, A ,

де, I_1 – величина струму, що тече в початок труби, A .

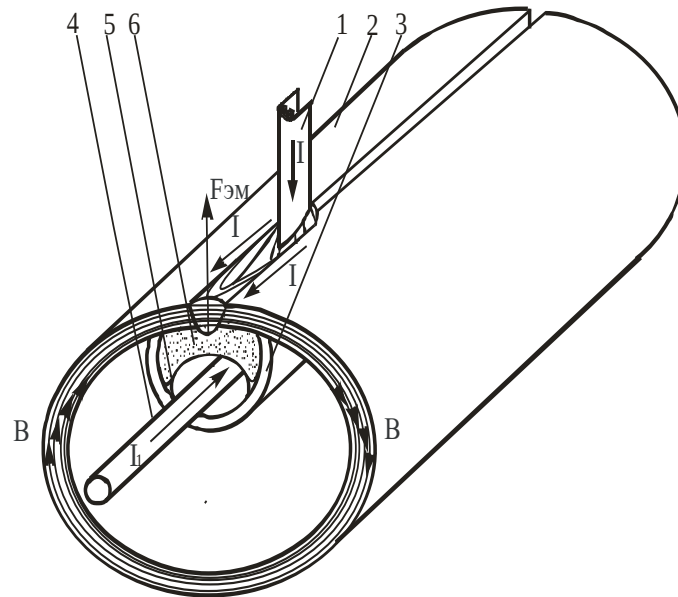


Рисунок 6 – Одностороннє високошвидкісне зварювання труб
де, 1 – складовий електрод; 2 – труба, що зварюється;
3 – феромагнітна труба усередині; 4 – струмопровідний кабель; 5 – пневмошланг;
6 – флюсова подушка

При протіканні всередині труби струму протилежного напрямку струму, який тече по трубі, згідно з принципом суперпозиції, у ванні створюється результуюче магнітне поле, напрямком якого визначається струмом всередині труби. У результаті, запобігається магнітне дуття, підвищується стабільність процесу, у ванні створюються, спрямовані вгору, електромагнітна сила і магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни, що забезпечує якісне формування швів на флюсовій подушці та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань при односторонньому високошвидкісному зварюванні.

ВИСНОВКИ

1. Отримано математичні моделі розрахунку індукції магнітного поля при зварюванні пластин та труб, адекватність яких підтверджена при моделюванні процесу та зварюванні труб для газо- та нафтопровідних магістралей. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено вплив форми виробу на розподіл поля та індукцію, яка при зварюванні труб у π раз більше, ніж при зварюванні пластин.

2. Магнітне дуття при зварюванні труб зростає, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феро-магнітної труби, що володіє великою магнітною проникністю,

Машинобудування і зварювальне виробництво

підвищення індукції, електромагнітної сили, що діє на дугу і магнітного тиску, який зростає більш ніж в 10 разів.

3. Магнітне дуття особливо посилюється при протіканні всередині труби струму, напрямком якого збігається з напрямком струму, що тече трубою, згідно з принципом суперпозиції і внаслідок концентрації силових ліній поля у феромагнітній трубі. При протіканні всередині труби струму, протилежного напрямку струму в трубі, запобігається магнітне дуття, створюється магнітне поле протилежного напрямку, і виникають спрямовані вгору електромагнітні сили та магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни при односторонньому зварюванні на флюсовій подушці.

4. Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб, при якому, за рахунок пропускання всередині феромагнітної труби струму протилежного напрямку зварювальному струму, запобігається магнітне дуття, підвищується стабільність процесу, створюються спрямовані вгору електромагнітна сила і магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни, що забезпечує якісне формування швів при зварюванні на флюсовій подушці та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Список використаних джерел

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму / Р.М. Уайт. - К.: Світ, 1982. - 306с.
2. Абрамович Г.П. Прикладна газова динаміка / Г.П. Абрамович. - К.: Наука, 1989. - 824с.
3. Зільберман Г.Є. Електрика та магнетизм / Г.Є. Зільберман. - К.: Наука, 1980. - 383с.
4. Корольков П.М. Природа виникнення та методи усунення магнітного дуття при зварюванні / П.М. Корольков // Зварювальне виробництво. – 1998. – №5. – С.6–8.
5. Blakeley P.J. Magnetic arc blowcanses, effects and cures / P.J. Blakeley //Metal Construction. – 1988. – №2. – Vol.20. – P.10 – 13.
6. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields // Metal Construction. – 1984. – №7. – Vol.16. – P.441 – 445.
7. Blakeley P.J., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding //Welding Journal. – 1984. – №1.– P.42 – 49.
8. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 2. Effects and solutions //Metal Construction. – 1984. – №8. – Vol.16. – P.496 – 500.
9. Пат.54852 А Україна, МПК В23 К 9/18 Спосіб електродугового одностороннього зварювання труб / Щетинін С.В.

Shchetynin S.V., Desiatskyi S.P.

CONTROL OF THE MAGNETIC FIELD OF WELDING CURRENT IN PIPE WELDING

The increase in pipe production is due to the rapid development of pipeline transportation of gaseous, liquid and bulk media, the further development of urban development and various branches of mechanical engineering.

The widespread use of pipes is due to the possibility of transporting various products through them and the high mechanical properties of pipes, which, despite their relatively small mass, have a significant margin of safety and high resistance to bending and twisting.

The greatest demand on the global market is for pipes for main gas and oil pipelines, which are operated at temperature fluctuations (from -40 to +50°C) and are made of carbon and low-alloy steels.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Ukraine is economically interested in transporting gas and oil through its territory and building pipelines. Therefore, it is advisable to develop new methods of welding pipes that ensure increased productivity, quality and impact strength of welded joints, reduce energy consumption, material consumption and cost of pipes.

Currently, high-quality formation of welds during one-sided welding is ensured by retaining the liquid metal of the weld pool with special linings, fluxes, copper and copper-flux pads, and a transverse magnetic field.

When welding pipes, according to the developed method, the area covered by the active spot increases, the arc pressure decreases by 4 times, which ensures high-quality formation of the return roller on the flux pad during single-sided high-speed welding, regardless of the gap in the joint.

The pattern of distribution of the magnetic field of the welding current in the weld pool, plates and pipes has been established. When the current flows through the plates, the induction in the middle of the metal thickness is zero and increases as it approaches the surface. The maximum value of the induction is located on the surface. When moving from the upper to the lower surface, the induction changes direction to the opposite.

Keywords: magnetic blast, magnetic field induction, relative magnetic permeability of ferromagnets, ferromagnetic pipe.

Стаття надійшла 08.05.2025 р.

УДК 621.179.92

doi.org/10.31498/2522-9990292025330216

Зусін А.М.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ КОЛІС МОСТОВИХ КРАНІВ З ВИКОРИСТАННЯ НАПЛАВНОГО МАТЕРІАЛУ З МЕТАСТАБІЛЬНИМ АУСТЕНИТОМ

Ходові колеса мостового крана є елементом конструкції, які найчастіше виходять з ладу та вимагають відновлення та ремонту. Причина – знос реборд коліс. Тому фахівцям у галузі підйомно – транспортного обладнання потрібно знати вимоги до вибракування ходових коліс та методи їх відновлення. Вантажопідйомні крани займають провідне місце в системі машин для механізації монтажних та вантажно-розвантажувальних робіт у будівництві. За допомогою вантажопідіймальних кранів досягаються високі темпи та індустріальність виробництва будівельно-монтажних робіт.

Кранами мостового типу називаються вантажопідіймальні крани, з вантажозахоплюючим органом, підвішеним до вантажного візка, до поворотної стріли на вантажному візку або талі, що переміщається по пересувному мосту.

До них відносяться: а) Мостові крани – крани мостового типу з безпосереднім спиранням моста на надземний крановий шлях; б) Козлові крани – крани мостового типу з опиранням моста на крановий шлях за допомогою двох опорних стійок; в) Напівкозлові крани – крани мостового типу з опиранням моста на крановий шлях з одного боку безпосередньо, а з іншого – за допомогою опорної стійки.

Зношування, що виникає під впливом різних факторів (робота просто неба, в умовах запиленості, атмосферних опадів і т.п.) при нормальній експлуатації кранів називається природним, а його результат – природним зносом. Зношування, що протікає швидко і є результатом поганого догляду, дефектів виробництва, називається аварійним, яке результат – аварійним зносом. За характером взаємодії тертьових поверхонь розрізняють механічні, молекулярно-механічні та корозійно-механічні види зношування кранів.