

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ НА ДІЮЧИХ ГАЗОПРОВОДАХ

А. В. Василик¹, Л. С. Шлапак¹, М. Д. Степ'юк², В. Ю. Пеньківський², О. А. Рудюк¹

¹ ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506612,
e-mail: ztk@nuing.edu.ua

² УМГ «Прикарпаттрансгаз»; 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 48,
e-mail: Vpenkivskiy.ptg@naftogaz.net

Описано технологічні особливості зварювальних робіт на газопроводах під тиском газу. В рамках теорії теплопровідності при зварюванні сформульовано вихідні положення для постановки крайової задачі. Зварювальна дуга моделюється як розподілене джерело тепла з коефіцієнтом зосередженості k і плямою нагріву d_n . Наведено залежність параметрів дуги від зварювального струму. Описано порядок розрахунку коефіцієнта теплообміну на внутрішній поверхні труби за наявності в ній потоку газу, наведено теплофізичні дані газу. Побудовано математичну модель зварювання кругового шва на трубі. Наведено аналітичний розв'язок задачі. Виведено співвідношення розподілу теплової потужності дуги при зварюванні кутових швів. На прикладі розрахунку температурних полів при зварюванні кругових швів, відмічено асиметрію процесу поширення тепла в ділянці металу усередині кругового шва і за його межами. Максимуми температур на внутрішній поверхні труб послідовно зміщуються в сторону центру обертання. Процес нагрівання внутрішньої поверхні труби в зоні зварювання продовжується і після завершення кругового шва. Відзначено охолоджувальну дію потоку газу на формування температурного поля. Намічено шляхи удосконалення математичної моделі для розрахунку процесів розподілу тепла при зварюванні кругових швів.

Ключові слова: газопровід, поверхнєве розподілене зварювальне джерело, круговий шов, математична модель, температурне поле, ізотерма.

Описаны технологические особенности выполнения сварочных работ на газопроводах под давлением газа. В рамках теории теплопроводности при сварке сформулированы исходные положения для постановки краевой задачи. Сварочная дуга рассматривается как распределенный источник тепла с коэффициентом сосредоточенности k и пятном нагрева d_n . Приведена зависимость параметров дуги от сварочного тока. Рассмотрен порядок расчета коэффициента теплообмена на внутренней поверхности трубы при наличии в ней потока газа, приведены тепло-физические данные газа. Построена математическая модель сварки кругового шва на трубе. Приведено аналитическое решение задачи. Выведено соотношение распределения тепловой мощности дуги при сварке угловых швов. На примере расчета температурных полей при сварке круговых швов на поверхности трубы отмечена асимметрия процесса распространения тепла на участке металла внутри кругового шва и за его пределами. Максимумы температур на внутренней поверхности труб последовательно смещаются в сторону центра вращения. Процесс нагревания внутренней поверхности трубы в зоне сварки продолжается и после завершения кругового шва. Отмечено охлаждающее действие потока газа на формирование температурного поля. Намечены пути усовершенствования математической модели для расчета процессов распределения тепла при сварке круговых швов.

Ключевые слова: газопровод, поверхностный распределенный сварочный источник, круговой шов, математическая модель, температурное поле, изотерма.

The technical specifications are described while conducting the welding works on gas-pipelines under gas pressure. In accordance with the theory of welding heat conduction the assumptions for boundary-value task setting is formulated. The welding arc is modeled as a distributed heat source with concentration coefficient k and heating spot d_n . The dependence of arc parameters from the welding current is shown. The calculation of heat transfer coefficient on the inner surface of the pipe with the gas flow is also described; the thermo-physical gas data are presented. A mathematical model of circular welding seam on the pipe is developed. The analytical solution to the problem is offered. The correlation of arc heat capacity distribution under fillet welds welding is calculated. By the example of the temperature fields calculation under circular joints welding, some asymmetry of the heat distribution process in the metal area inside the circular weld and beyond is detected. Temperatures maximum on the inner surface of the pipe is consistently shifted towards the center of rotation. The heating process on inner surface of pipes within the welding zone continues after the circular seam process is over. Cooling effect of the gas flow on the temperature field formation is observed. Some ways to improve the mathematical model of distributed heat of circular welding seam on the pipe are suggested.

Keywords: gas pipeline, welding surface source, circular seam, mathematical model, the temperature field isotherm.

Вступ. У процесі експлуатації магістральних газопроводів високого тиску можуть виникати різні дефекти, пов'язані з корозійними ураженнями металу труб, зсувами ґрунту, конструкторськими і будівельними помилками,

стороннім втручанням тощо. В останні роки часто ремонтні роботи, включно із зварювальними роботами, виконуються безпосередньо на діючих газопроводах без випорожнювання природного газу. В окремих випадках прово-

дять зварювальні роботи, пов'язані з приєднанням відводів до діючого газопроводу. Огляд існуючих способів ремонтно-відновлювальних робіт та обґрунтування застосування зварювання на газопроводах під тиском проведено в роботах [1, 2].

У ході зварювальних робіт безпосередньо на газопроводі, що знаходиться під тиском газу, виникає низка технологічних ускладнень.

По-перше, слід виключити можливість наскрізного проплавлення металу труби, а, отже, небезпеку загорання газу.

По-друге, при виконанні зварювання на зовнішній поверхні труби нерозплавлена ділянка в зоні зварювання може нагріватися до температур, при яких міцнісні характеристики матеріалу труби суттєво знижуються. Під дією внутрішнього тиску на цій ділянці труби може відбутися руйнування.

По-третє, на внутрішній поверхні труби від зварювального нагріву може досягатися температура, при якій приповерхневий шар газу буде дисоціювати, наприклад, за реакцією $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_{(\text{тв.})} + 2\text{H}_2$. При підвищених температурах продукти такої дисоціації адсорбуються на поверхні труби і дифундувати в стінку. Іншими словами, при проведенні зварювальних робіт слід брати до уваги можливі процеси науглецювання і наводнювання металу, які можуть призвести до зміни механічних властивостей, зокрема, до окрихчення металу труб у зоні зварного з'єднання.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. За результатами кількарічних програмних досліджень, проведених дослідницькими організаціями Batelle Memorial Institute (BMI) і Edison Welding Institute (EWI) [3–5], мінімальна товщина стінки труб газопроводів високого тиску, на яких виконуються зварювальні операції, може складати 4,0...4,8 мм. При цьому максимальна температура внутрішньої поверхні не повинна перевищувати 982°C.

Сучасні газопроводи високого тиску виготовляються з низьколегованих сталей підвищеної міцності, зварюваність яких значною мірою визначається видом термічного циклу зварювання. Зокрема, при високій швидкості охолодження внаслідок охолоджувальної дії потоку газу у високотемпературній ділянці зони термічного впливу (ЗТВ) може формуватися структура з високою твердістю і підвищеною схильністю до холодних тріщин, сульфідного та інших видів корозійного розтріскування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Таким чином, при проведенні зварювальних робіт на газопроводах, заповнених газом, слід розробляти технологічний процес з оптимальними режимами зварювання.

Не менш важливим фактором є температурна оцінка розігрітої ділянки труби під зварювальною ванною, температура якої в процесі зварювання не перевищувала б величини, при

якій метал практично втрачає пружно-пластичні властивості. В роботі [1] для розрахунку температурного поля використовувалась розрахункова схема точкового джерела на поверхні плоского шару.

Нижче розглядається математична модель наплавлення кругового шва на поверхні труби. Така модель придатна для побудови температурних полів в металі труби, до якої приварюється інша труба меншого діаметра круговим кутовим швом. Припускається, що через основну трубу транспортується природний газ.

Побудову математичної задачі здійснимо в такій послідовності.

1. Зварювальна дуга розглядається як плоске розподілене джерело. Розподіл енергії у зварювальних дугах визначається багатьма факторами (розміри і форма електродів, тип електрода (плавкий чи неплавкий), вид струму дуги (постійний чи змінний), полярність процесу тощо). Фізичні особливості горіння дуги є такими, що тепловий потік, утворюваний при цьому, розподілений на поверхні деякої плями за нормальним гаусівським законом [6] (рис. 1). Умовно прийнято вважати, що діаметр плями нагріву, через яку тепло уводиться в метал, є таким, що поверхнева густина теплового потоку, який падає на пляму, складає $0,05q_{\text{max}}$. При цьому

$$q = q_{\text{max}} \exp(-kr^2), \quad (1)$$

де q – розподіл поверхневої густини теплового потоку в напрямі радіуса r , $\text{Вт}/\text{см}^2$;

k – коефіцієнт зосередженості теплового потоку джерела, $1/\text{см}^2$;

q_{max} – максимальна поверхнева густина теплового потоку в центрі плями нагріву, $\text{Вт}/\text{см}^2$.

Якщо електрична дуга щосекундно уводить в тіло q Дж тепла, то з урахуванням (1) можна записати

$$q = \int_0^{\infty} q \cdot 2\pi r dr = 2\pi q_{\text{max}} \int_0^{\infty} \exp(-kr^2) r dr \quad (2)$$

і після інтегрування [7, інтеграл № 860.12] отримуємо

$$q = \frac{\pi q_{\text{max}}}{k}. \quad (3)$$

Використовуючи залежність (1), запишемо

$$q(r_n) = q_{\text{max}} \exp(-kr_n^2) = 0,05q_{\text{max}}, \quad (4)$$

де r_n – радіус плями нагріву.

З (4) отримуємо

$$\exp(-kr_n^2) = 0,05,$$

звідки

$$r_n^2 = \frac{3}{k}; \quad r_n = \frac{1,732}{\sqrt{k}}. \quad (5)$$

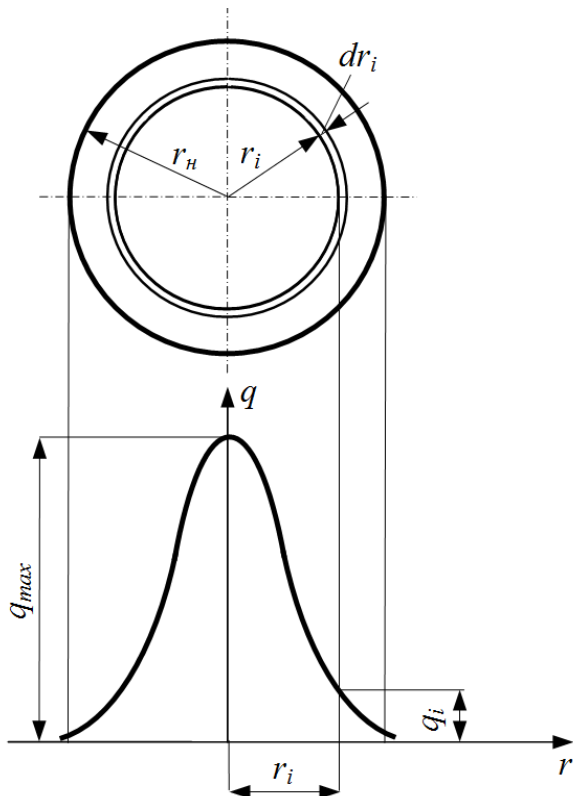


Рисунок 1– Схема розподілу питомої теплової потужності джерела за нормальним законом

За результатами експериментальних досліджень [7] зі збільшенням зварювального струму тепловий потік стає менш зосередженим при одночасному збільшенні плями нагріву (рис. 2) наведено залежність параметрів k і d_n .

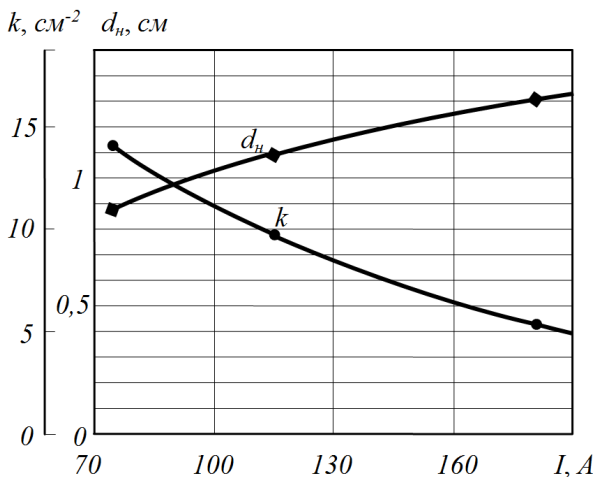


Рисунок 2– Залежність параметрів k і d_n від сили струму (аргоно-дугове зварювання плавким електродом)

2. Для виведення рівняння для розрахункової схеми миттєве розподілене джерело тепла на поверхні плоского шару за вихідне використаємо рівняння поширення тепла від дії миттєвого точкового джерела на поверхні плоскому шару (рис. 3) [8]:

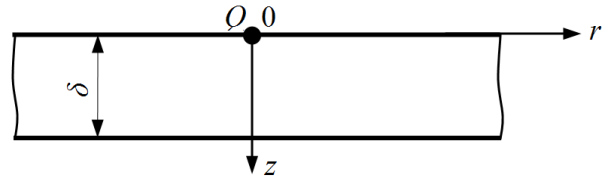


Рисунок 3 – Розрахункова схема “миттєве точкове джерело в плоскому шарі”

$$T(r, z, t) = \frac{Q}{2\pi\lambda\delta} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(\mu_n z) \cdot \mu_n}{D_n} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4at} - \mu_n^2 at\right). \quad (6)$$

Тут Q – тепловий імпульс (Дж), який внесено в пластину, Дж;

δ – товщина пластини, см;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини, Дж/(см·°C);

a – коефіцієнт температуропровідності, см²/с;

$z, r^2 = x^2 + y^2$, де x, y – координати вибраної точки в пластині, см;

В рівнянні (6)

$$\psi_n(\mu_n z) = \mu_n \cos\left(\mu_n \frac{z}{\delta}\right) + \frac{\alpha_1}{\lambda} \delta \sin\left(\mu_n \frac{z}{\delta}\right); \quad (7)$$

$$D_n = \frac{1}{\left(\mu_n^2 + Bi_2^2\right)} \times \quad (8)$$

$$\times \left\{ \left(\mu_n^2 + Bi_1^2\right) \cdot \left[Bi_2 + \left(\mu_n^2 + Bi_2^2\right)\right] + Bi_1 \left(\mu_n^2 + Bi_2^2\right) \right\}.$$

В рівнянні (8) уведено безрозмірні величини (критерії Біо)

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda} \delta; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda} \delta, \quad (9)$$

де α_1 і α_2 – відповідно коефіцієнти поверхневої тепловіддачі з верхньої і нижньої поверхні робочого тіла, Дж/(см²·°C).

Корені μ_n визначаються з характеристичного рівняння

$$\text{ctg} \mu = \frac{\mu^2 - Bi_1 \cdot Bi_2}{(Bi_1 + Bi_2) \cdot \mu}. \quad (10)$$

3. Розглянемо схему дії миттєвого кругового розподіленого джерела на поверхні плоского шару (рис. 4).

Розіб'ємо площину XOY , на якій діє джерело, на елементи $dF = dx'dy'$. Кількість тепла $dQ = q(r')dx'dy'dt$, яку прикладено в початковий момент часу $t = 0$ до елементу площі dF в точці $B(x', y')$ поверхні тіла, будемо розглядати, як миттєве точкове джерело.

На схемі R' – віддаль від довільної точки $A(x, y, z)$ до миттєвого точкового джерела в точці $B(x', y', 0)$

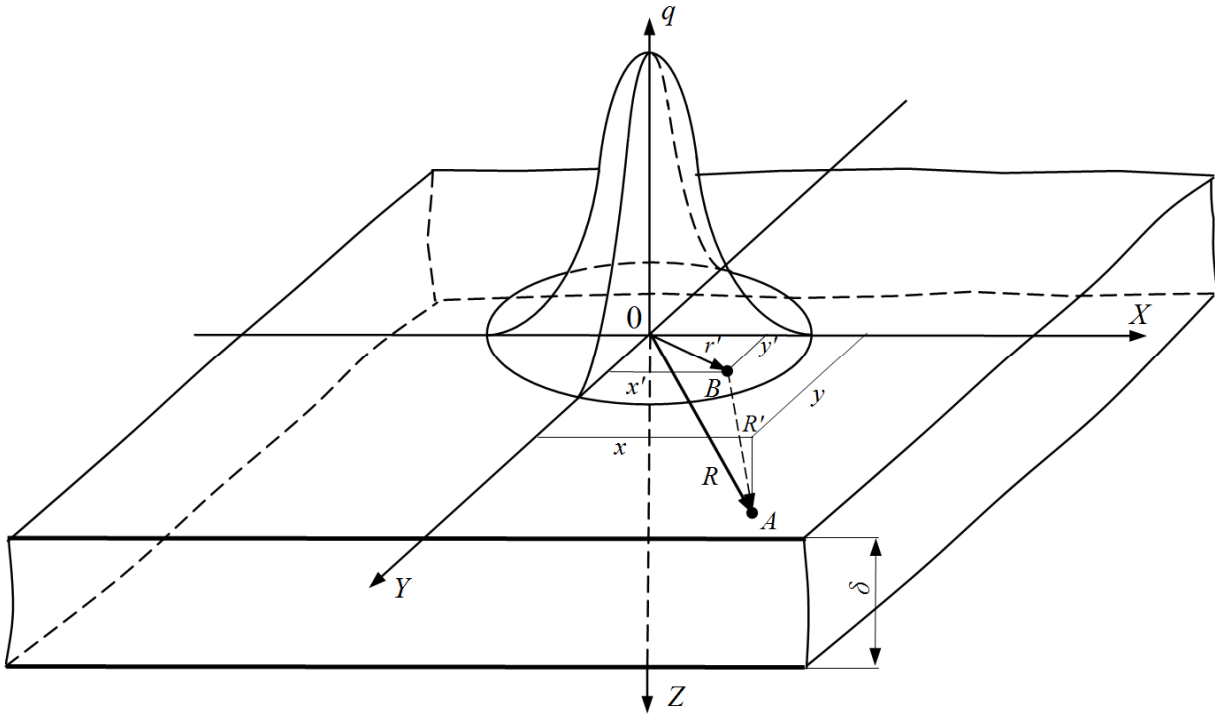


Рисунок 4 – Схема нагрівання плоского шару поверхневим нормально-круговим джерелом

$$R'^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2.$$

Тоді для розглядуваного випадку на основі рівняння (6) можна записати:

$$dT(r, z, t) = \frac{q_{\max}(r') dx' dy' dt}{2\pi\lambda\delta t} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\psi_n(z)\mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4at}\right] \times \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} at - k(x'^2 + y'^2)\right] \right\}. \quad (11)$$

Використовуючи принцип суперпозиції, процес поширення тепла $T(x, y, z)$ від нормально-кругового джерела у плоскому шарі запишемо:

$$T(r, z, t) = \int_F dT(x, y, z, t). \quad (12)$$

Далі, поширюючи інтегрування за змінними x' і y' в межах від $-\infty$ до $+\infty$, запишемо

$$dT(x, y, z, t) = \frac{q_{\max} dt}{2\pi\lambda\delta t} \cdot \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z)\mu_n}{D_n} \times \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4at}\right] \times \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} at - k(x'^2 + y'^2)\right] \right\}. \quad (13)$$

Перепишемо (13) у вигляді

$$dT(x, y, z, t) = \frac{q_{\max} dt}{2\pi\lambda\delta t} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z)\mu_n}{D_n} \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} at\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4at} - kx'^2\right] dx' \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y-y')^2}{4at} - ky'^2\right] dy'. \quad (14)$$

Проведемо прості перетворення в інтегралах виразу (14).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4at} - kx'^2\right] dx' = \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(1+4atk)}{4at} x'^2 + \frac{x}{2at} x'\right] dx'.$$

Подібним чином переписується і інтеграл за змінною y' .

Після таких перетворень можна використати табличний інтеграл [9, № 3.323.2]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-p^2 x^2 \pm qx) dx = \exp\left(\frac{q^2}{4p^2}\right) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{p}, \quad [p > 0].$$

З урахуванням наведених перетворень та інтегрування виразу (14) отримуємо

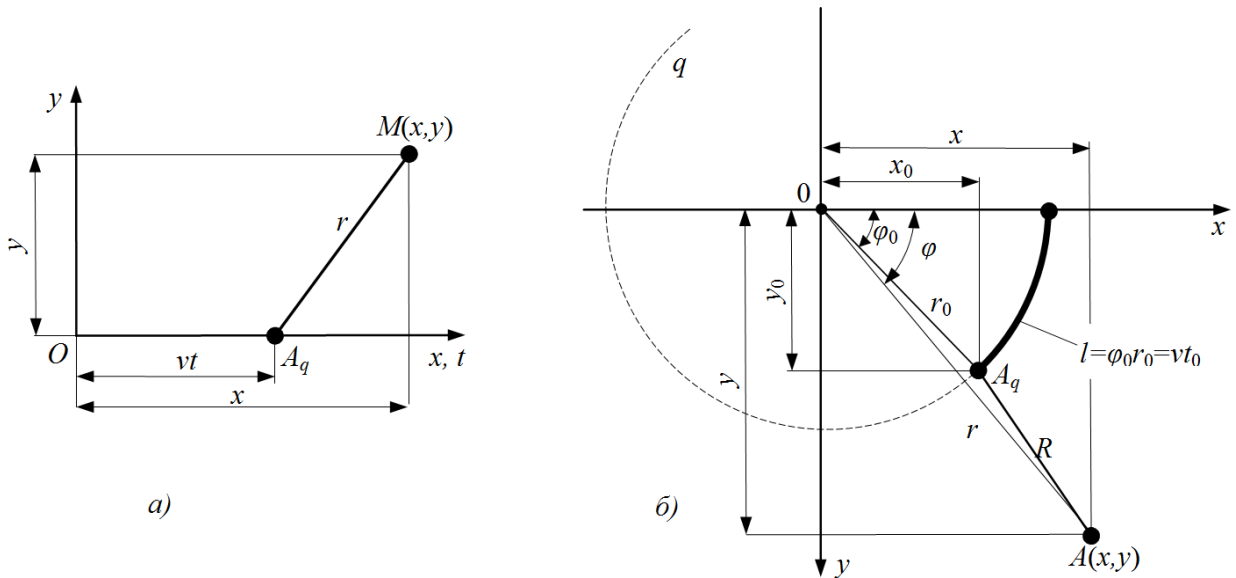


Рисунок 5 – Розрахункова схема рухомого по прямій лінії (а) і по колу (б) розподіленого джерела на поверхні листа

$$dT(x, y, z, t) = \frac{q_{\max} dt}{\lambda \delta} \cdot \frac{2a}{1 + 4atk} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at}\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z) \mu_n}{D_n} \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} at\right). \quad (15)$$

Враховуючи зв'язок між загальною ефективною тепловою потужністю q (Дж/с) і параметрами нормального розподілу питомого теплового потоку q_{\max} і k за співвідношенням (3), рівняння (15) зрештою набуде вигляду

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2qakdt}{\pi\lambda\delta(1 + 4atk)} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at}\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z) \mu_n}{D_n} \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} at\right) \quad (16)$$

і виражатиме приріст температури в плоскому шарі від дії миттєвого розподіленого джерела в момент $t = 0$.

4. Для випадку дії нормально-кругового джерела протягом деякого кінцевого проміжку часу t_0 температуру в тілі можна представити як послідовне спрацювання нескінченно великого числа миттєвих джерел, час спрацювання яких рівномірно розподілиться на часовому відрізку $[0, t_0]$.

Тоді, використовуючи рівняння (16), можна записати:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^{t_0} \frac{2qakd\tau}{\pi\lambda\delta[1 + 4ak(t - \tau)]} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4a(t - \tau)}\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z) \mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} a(t - \tau)\right]. \quad (17)$$

Зробимо в (17) заміну змінної $t' = t - \tau$. Тоді, враховуючи $\tau = t - t'$; $d\tau = -dt'$. При $\tau = 0$ $t' = t$; при $\tau = t_0$ $t' = t - t_0$.

Остаточню вираз (17) прийме вигляд

$$T(x, y, z, t) = \frac{2qak}{\pi\lambda\delta} \cdot \left\{ \int_{t-t_0}^t \frac{dt'}{(1 + 4akt')} \right\} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z) \mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{4at'} - \frac{\mu_n^2 a}{\delta^2} t'\right]. \quad (18)$$

5. Рухоме (вздовж осі x) нормально-кругове розподілене джерело тепла на поверхні плоского шару опишемо за схемою на рис. 5, а. Нехай в момент часу τ джерело знаходиться в точці O_1 на віддалі $v\tau$ від початку координат.

У відповідності з (18), температура в точці $M(x, y)$ відносно нерухомої системи координат XOY від безперервної протягом часу t_0 дії розподіленого джерела визначиться з рівняння

$$T(x, y, z, t) = \int_0^{t_0} \frac{2qakd\tau}{\pi\lambda\delta[1 + 4ak(t - \tau)]} \times \quad (19)$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z) \mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{(x - v\tau)^2 + y^2}{4a(t - \tau)} - \frac{\mu_n^2}{\delta^2} a(t - \tau)\right].$$

Рівняння (19) описує процес поширення тепла в плоскому шарі при переміщенні джерела вздовж осі x .

Необхідно відзначити, що при виведенні формули (19) припускалося, що час τ пов'язаний з дією джерела зварювального нагріву, а після припинення його дії тепло продовжує поширюватися впродовж часу t .

6. Розглянемо схему (рис. 5, б), в якій розподілене джерело постійної потужності q ру-

хається на поверхні робочого тіла рівномірно по колу радіусом r_0 .

На схемі R – віддаль від досліджуваної точки A до джерела (точка A_q), яка виразиться рівнянням

$$R^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2. \quad (20)$$

Беручи до уваги

$$x = r \cos \varphi; \quad y = r \sin \varphi;$$

$$x_0 = r_0 \cos \varphi_0; \quad y_0 = r_0 \sin \varphi_0,$$

після простих перетворень вираз (20) набуде вигляду

$$R^2 = r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (21)$$

і далі, враховуючи, що $v\tau = \varphi_0 r_0$, рівняння (21) перепишеться так:

$$R^2 = r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos\left(\varphi - \frac{v\tau}{r}\right). \quad (22)$$

Тут v – швидкість переміщення джерела, см/с.

Використовуючи рівняння (19) і переходячи до циліндричних координат, отримаємо

$$T(r, z, t) = \frac{2qak}{\pi\lambda\delta} \times$$

$$\times \left\{ \int_0^{t_0} \exp\left[-\frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos\left(\varphi - \frac{v\tau}{r_0}\right)}{4a(t-\tau)}\right] d\tau \right\} \times (23)$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z)\mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} a(t-\tau)\right] \left[\frac{d\tau}{1 + 4ak(t-\tau)} \right],$$

яке є розв'язком задачі для випадку рухомого із швидкістю v по колу радіусом r_0 джерела на поверхні плоского шару.

Використовуючи співвідношення (5), розв'язок задачі (23), можна записати в іншому вигляді, а саме

$$T(r, z, t) = \frac{6qa}{\pi\lambda\delta} \times$$

$$\times \left\{ \int_0^{t_0} \exp\left[-\frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos\left(\varphi - \frac{v\tau}{r_0}\right)}{4a(t-\tau)}\right] d\tau \right\} \times (24)$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(z)\mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{\delta^2} a(t-\tau)\right] \left[\frac{d\tau}{r_n^2 + 12a(t-\tau)} \right].$$

Відзначимо, що при розв'язанні задачі початкова температура тіла приймалась рівною нулю.

7. В розв'язку (23) або (24) величина q виражає повну ефективну потужність зварювального джерела

$$q = I_{зв} U_{\delta} \eta_u, \quad (25)$$

де $I_{зв}$ – зварювальний струм, А;

U_{δ} – напруга дуги, В;

η_u – ефективний к. к. д. зварювальної дуги.

Натомість в розглядуваній задачі ця повна теплова потужність розподіляється між основною трубою і стінкою (рис. 7).

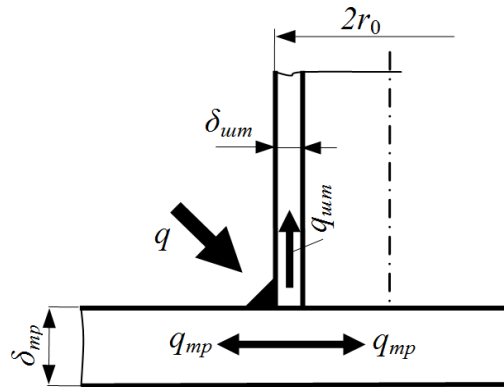


Рисунок 7 – Схема розподілу теплової потужності зварювального джерела

Розподіл тепла між стінкою штуцера і стінкою труби можна визначити, виходячи з відношення з об'ємів зварюваних елементів [10]. Припустивши

$$q = 2q_{mp} + q_{um}, \quad (26)$$

поширення тепла в стінки відповідно штуцера і труби буде визначатися співвідношенням

$$\frac{V_{um}}{2V_{mp}} = \frac{q_{um}}{2q_{mp}}. \quad (27)$$

Величини об'ємів матеріалів штуцера і труби, в яких формуються теплові потоки, в основному будуть визначатися товщинами з'єднаних елементів, тому можна записати

$$\frac{\delta_{um}}{2\delta_{mp}} = \frac{q_{um}}{2q_{mp}}, \quad (28)$$

звідки отримаємо відповідно

$$q_{um} = q \cdot \frac{\delta_{um}}{2\delta_{mp} + \delta_{um}} \quad (29)$$

$$i \quad 2q_{mp} = q \cdot \frac{2\delta_{mp}}{2\delta_{mp} + \delta_{um}}. \quad (30)$$

Остаточне розрахункове рівняння для оцінки процесів поширення тепла в трубі при зварюванні кругового шва в трубі з урахуванням початкової температури тіла T_0 прийме вигляд

$$T(r, t) = \frac{2q_{mp}ak}{\pi\lambda\delta} \times$$

$$\times \left\{ \int_0^{t_0} \exp\left[-\frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos\left(\varphi - \frac{v\tau}{r_0}\right)}{4a(t-\tau)}\right] d\tau \right\} \times (31)$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\psi_n(\mu_n z)\mu_n}{D_n} \exp\left[-a \frac{\mu_n^2}{\delta^2} (t-\tau)\right] \frac{d\tau}{t-\tau} \Bigg\} + T_0.$$

Інтеграл у рівнянні (31) не виражається у замкнутому вигляді і може обчислюватися числовими методами.

8. В розглянутій задачі коефіцієнт α_2 повинен урахувати охолоджувальну дію природного газу через відповідний коефіцієнт теплообміну $h_{газ}$, який залежить від теплофізичних даних природного газу [5] і визначається з рівняння у безрозмірному вигляді [11]

$$\frac{h_{газ}D}{\lambda_{газ}} = 0,023 \cdot \left(\frac{\rho_{газ}v_{газ}D}{\mu_{газ}} \right)^{0,8} \left(\frac{C_{p,газ}\mu_{газ}}{\lambda_{газ}} \right)^{0,4} \quad (32)$$

Тут: $C_{p,газ}$ – питома теплоємність газу, ($C_{p,газ} = 2245,36$ Дж/кг·К);

$\rho_{газ}$ – густина газу, ($\rho_{газ} = 36,9$ кг/м³);

$\lambda_{газ}$ – коефіцієнт теплопровідності газу,

($\lambda_{газ} = 3,5354 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К);

$\mu_{газ}$ – в'язкість газу, ($\mu_{газ} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ Па·с);

D – діаметр труби, м;

$v_{газ}$ – швидкість потоку газу, м/с.

На рис. 8 наведено залежність коефіцієнта теплообміну на внутрішній поверхні труби від швидкості потоку газу для двох діаметрів труб.

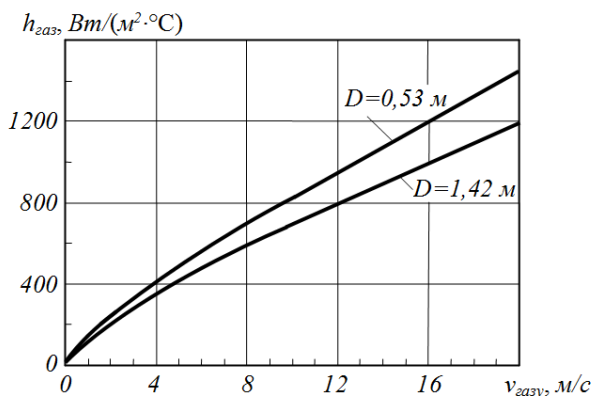


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта теплообміну газу від швидкості потоку газу для двох діаметрів труб

Для прикладу проведено розрахунки процесу поширення тепла в металі при виконанні кругового шва на поверхні труби. Для розрахунку приймалися такі вихідні дані:

Конструктивні розміри зварюваних елементів:

$D_{mp} = 530$ мм; $\delta_{mp} = 0,8$ см; $\delta_{шт} = 0,4$ см;
діаметр штуцера – 160 мм ($r_0 = 8$ см).

Режим зварювання:

$I_{зв} = 120$ А; $U_0 = 30$ В; $\eta_u = 0,75$;
 $V_{зв} = 9$ м/год = 0,25 см/с;

Теплофізичні постійні для низьколегованої сталі:

$a = 0,075$ см²/с; $\lambda = 0,35$ Вт/см·°С;
 $c_p = 4,77$ Дж/см³·°С);

Коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої поверхні труби α_1 0,001 Вт/см²·°С.

Коефіцієнт теплообміну на внутрішній поверхні труби:

$\alpha_2 = 0,048$ Вт/см²·°С (при $v_{газ} = 5$ м/с);

$\alpha_2 = 0,1455$ Вт/см²·°С (при $v_{газ} = 20$ м/с).

Безрозмірні параметри

$Bi_1 = 0,0023$; $Bi_2 = 0,11$ (при $v_{газ} = 5$ м/с);

$Bi_2 = 0,333$ (при $v_{газ} = 20$ м/с).

За результатами обчислень на рис. 9–12 побудовано графіки розподілу температур в трубі та ізотерми при зварюванні кругового шва.

На рис. 9 наведено графіки розподілу температури на внутрішній поверхні труби в радіальному напрямі вздовж різних променів в момент, коли було завершено повний круговий шов. Швидкість потоку газу прийнято 5 м/с. Ділянка металу, обмежена круговим швом, отримує додатковий підігрів порівняно з зовнішньою ділянкою за межами зварного шва. З рисунка видно, що максимумами температурних кривих зміщуються до центру обертання.

Залежності температур окремих точок внутрішньої поверхні труби від часу після виконання повного кругового шва наведено на рис. 10. Видно, що після завершення зварювання протягом деякого часу внутрішня поверхня труби як усередині кругового шва, так і за його межами, продовжує нагріватися. В розглядуваному випадку безпосередньо прилегли з обох сторін до зварного шва ділянки протягом кількох секунд додатково нагріваються приблизно на 100°С.

На рис. 11 і 12 наведено відповідно розподіли ізотерм у поздовжньому і поперечному перерізі повного кругового зварного шва на поверхні труби при різних швидкостях потоку газу. Видно, що швидкість потоку газу в трубі впливає на розподіл ізотерм по товщині труби.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Розроблено математичну модель для розрахунку процесів поширення тепла при зварюванні кругових швів.

2. При зварюванні кругових швів спостерігається асиметрія процесу поширення тепла в ділянці металу усередині кругового шва і за його межами. Максимуми температур на внутрішній поверхні труб послідовно зміщуються в сторону центру обертання.

3. Процес нагрівання внутрішньої поверхні продовжується і після завершення повного кругового шва.

4. Чітко прослідковується охолоджувальна дія продукту на характер поширення тепла при зварюванні і формування температурного поля.

5. Розроблена математична модель дозволяє визначити максимальні температури нагрівання внутрішньої поверхні труб при виконанні зварювальних робіт на зовнішній поверхні труб, а також визначити частку товщини стінки, в якій зберігатимуться пружні властивості металу.

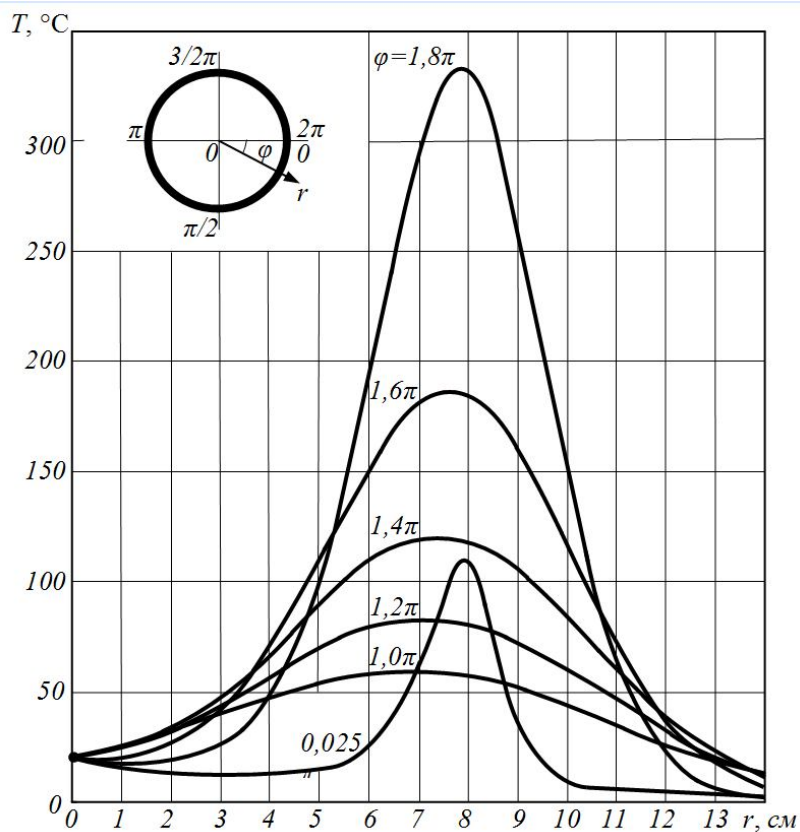


Рисунок 9 – Розподіл температур на внутрішній поверхні листа в радіальному напрямі вздовж різних променів у момент завершення повного кругового шва

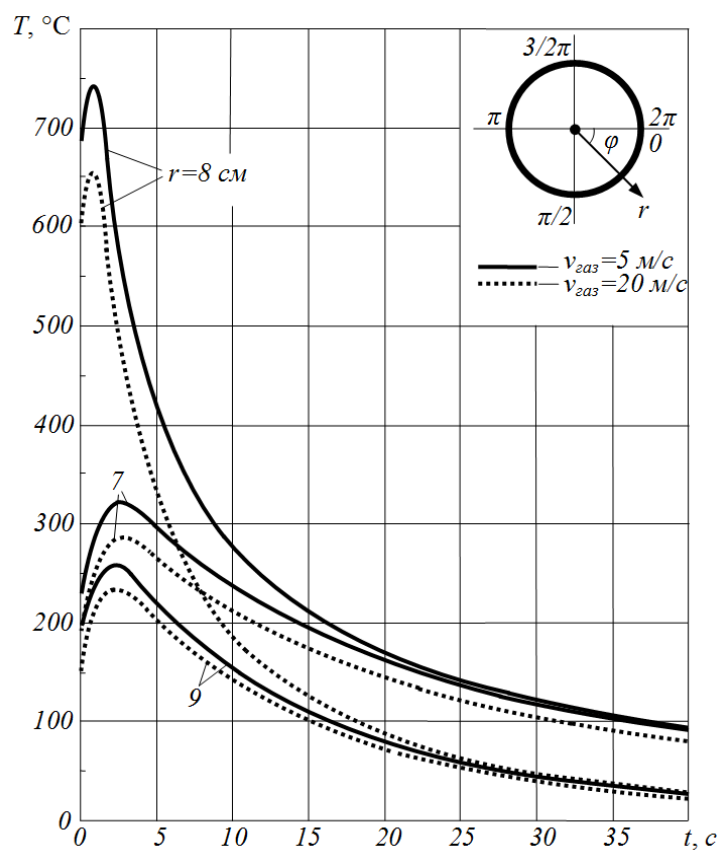
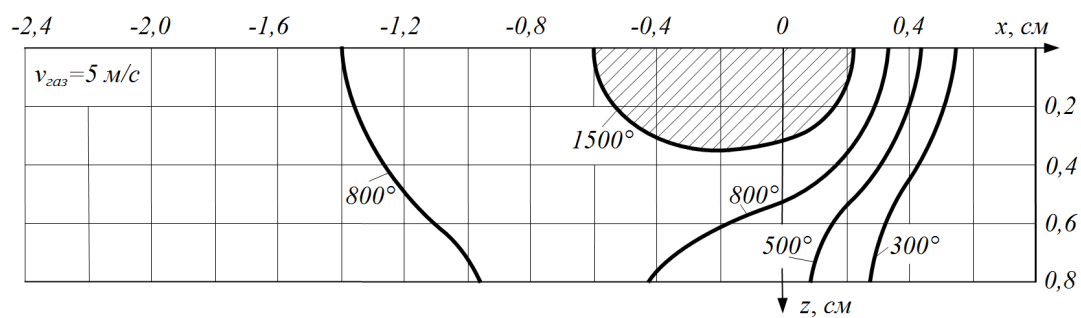
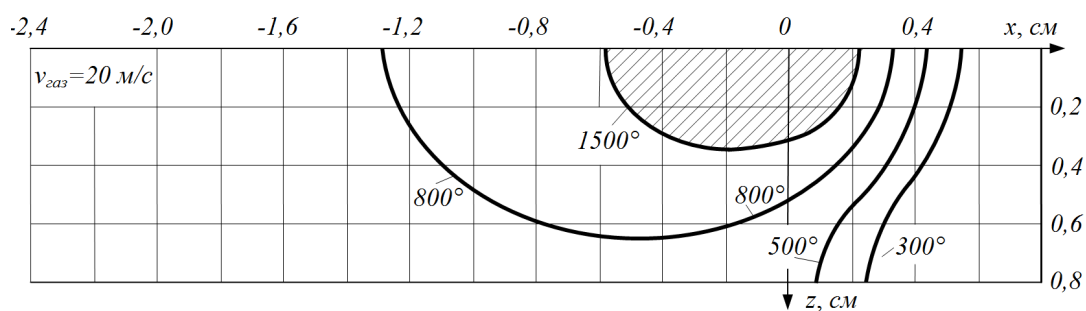


Рисунок 10 – Криві зміни температур внутрішньої поверхні листа вздовж променя $\varphi = 2,0\pi$ при різних r з моменту припинення дії джерела тепла

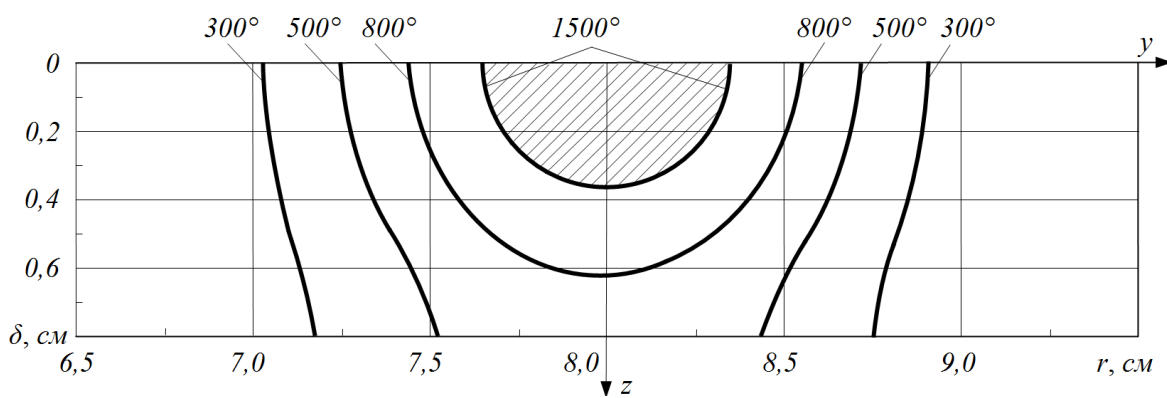


а)

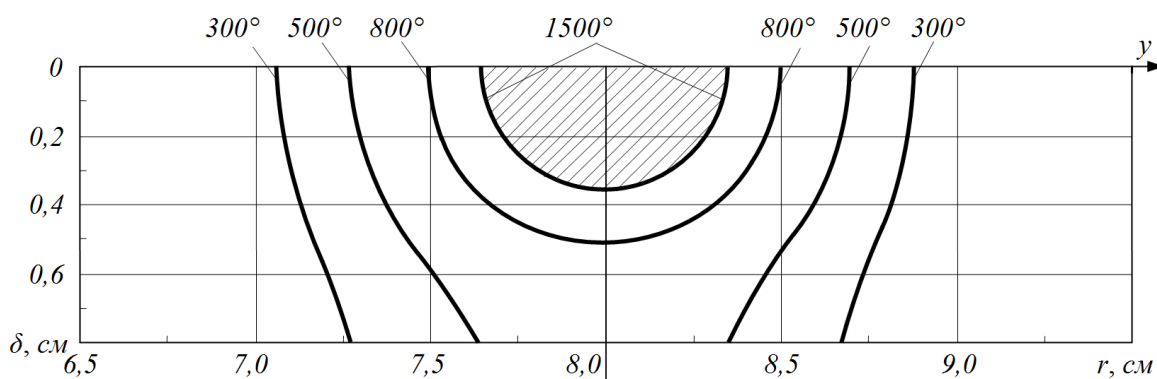


б)

Рисунок 11 – Ізотерми у поздовжньому перерізі по площині xOz при наплавленні кругового валика на поверхні листа при різних швидкостях газу у трубі



а)



б)

Рисунок 12 – Розподіл ізотерм в поперечному перерізі шва по площині Oyz при $\varphi=2\pi$ і швидкостях потоку газу $v_{газ}=5$ м/с (а) і $v_{газ}=20$ м/с (б)

Розроблена математична модель дозволяє зробити попередню оцінку температурного стану металу в зоні зварювання на поверхні труби. При подальшому удосконаленні математичної моделі доцільно враховувати залежність теплофізичних властивостей матеріалу, зокрема коефіцієнта теплопровідності від температури.

Вельми ефективним буде аналіз температурного поля в металі труби на основі розв'язання нелінійного диференціального рівняння теплопровідності за допомогою методу скінченних елементів (FEM).

Література

1 Бут В. С. Присоединение дуговой сваркой отводов к магистральным нефтепроводам под давлением / В. С. Бут. – М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 89 с.

2 Бут В. С. Обоснование применения дуговой сварки при ремонте магистральных трубопроводов под давлением / В. С. Бут, А. В. Щербак // Экспозиция. Нефть Газ. – 2007. – 17(37). – Август. – С. 38–40.

3 Kiefner J. F. Models aid pipeline repair welding procedures / J. F. Kiefner, R. D. Fisher // Oil & Gas Journal. – 1988. – 86(10). – P. 41–47.

4 Kiefner J. F. Effects of flowing product on line weldability/ aid pipeline repair welding procedures / J. F. Kiefner // Oil & Gas Journal. – 1988. – 86(29). – P. 49–54.

5 Cola M. J. Development of simplified weld cooling rate models for in-service gas pipelines / M.J. Cola, W.A. Bruce, J.F. Kiefner, R.D. Fisher, T.A. Bubenik, T.A. Jones, W.A. // Report Numbers AGA-93007083. – 1992. – 155 p.

6 Ерохин А. А. Основы сварки плавением. Физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

7 Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт. – М.: Наука, 1983. – 176 с.

8 Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні: навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / А. В. Василик, Я. М. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 209 с.

9 Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: Физматгиз, 1971. – 1108 с.

10 Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. – К.: ИНДПРОМ, 1998. – 640 с.

11 Acadams, W. H. Heat Transmission / W. H. Acadamas. – New York, N. Y. – McGraw-Hill. – 1958. – 532 p.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.10.12*

*Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.*