

УДК 629.463.001.63

О. В. Бурлуцький

(інженер кафедри «Механіка і проектування машин», Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків)

О. А. Логвіненко, к.т.н., доцент

(доцент кафедри «Механіка і проектування машин», Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків)

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЕЛЕМЕНТІВ НАПІВВАГОНІВ

Обґрунтована актуальність науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, спрямованих на дослідження температурної задачі правки газовим полум'ям деформацій, що виникають після зварювання рами напіввагона, у вигляді задачі Стефана з рухомим джерелом тепла. Відмічена доцільність розробки математичної моделі нагрівання металу, що виникає при правці деформацій, яка враховує теплоту фазового переходу, шляхом введення розподіленого в околиці поверхні розділу фаз джерела тепла. Наведені результати експериментального та розрахункового дослідження стосовно розподілу температури при правці хребтової балки напіввагона залежно від часу нагрівання.

Ключові слова: напіввагон, хребтова балка, деформації, правка, математична модель.

Обоснована актуальность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на исследование температурной задачи правки газовым пламенем деформаций, которые возникают после сварки рамы полувагона, в виде задачи Стефана с подвижным источником тепла. Отмечена целесообразность разработки математической модели нагрева металла, который возникает при правке деформаций, учитывающей теплоту фазового перехода, путем ввода, распределенного в окрестности поверхности раздела фаз, источника тепла. Приведены результаты экспериментального и расчетного исследования касательно распределения температуры при правке хребтовой балки полувагона в зависимости от времени нагрева.

Ключевые слова: полувагон, хребтовая балка, деформации, правка, математическая модель.

© Бурлуцький О. В., Логвіненко О. А., 2016

Постановка проблеми. В даний час найважливішою умовою вдосконалення зварювального виробництва є не тільки розвиток теоретичних основ зварювання з використанням новітніх досягнень у різних галузях фундаментальних і прикладних наук, а й створення високоефективних методів і засобів моделювання та імітації зварювальних процесів. Застосування математичних методів та математичного моделювання зварювальних процесів перетворилося на потужний інструментарій досліджень і пізнання процесів, що відбуваються в складних технологічних системах, що дозволяє не тільки отримати формалізований опис їх основних закономірностей, а й ефективно керувати ними. Математичне моделювання дозволяє оптимізувати умови протікання процесу утворення зварного з'єднання, запобігти появі недопустимих дефектів зварних швів, з'єднань конструкцій і одночасно підвищити продуктивність зварювальних операцій.

Тому проблема підвищення продуктивності праці і зниження собівартості виготовлення продукції завжди була і буде в центрі уваги будь-якого виробництва. Поряд з іншими технологічними процесами зварювання значною мірою визначає технічний рівень багатьох галузей промисловості і, зокрема, вагонобудування. Успіхи зварювальної науки і техніки дозволили здійснити справжній переворот у вагонобудуванні, створити принципово нові, високо економічні конструкції вантажних вагонів у яких в багато разів підвищено продуктивність праці при їх виготовленні [1, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на сьогоднішній день кількість освоєних методів зварювання за видами енергії активації більша ста, а варіантів тільки дугового зварювання більше тисячі. Тому поле діяльності для складання математичних моделей процесів зварювання, та їх вдосконалення є практично необмеженим. Слід відзначити, що математична модель напружено-деформованого стану елементів напіввагонів в процесі зварювання або теплової правки складається з двох взаємопов'язаних завдань: температурного та деформаційного.

Результати робіт [1, 2, 5, 6] показали, що при виготовленні хребтової балки напіввагона виникає значний прогин (від 65 мм до 120 мм), який необхідно знижувати. В роботі [7] проаналізовано сучасні методи та підходи правки деформацій, що виникають в процесі зварювання несучих металоконструкцій вантажних вагонів та їх елементів. Запропоновано класифікацію методів правки зварних конструкцій після зварювання в вагонобудуванні. З'ясовано, що найбільшого розповсюдження отримав метод термічної правки з місцевим нагрівом, як більш економічно доцільний. Наряду з цим відомі аналітичні рішення задачі теплопровідності зазвичай не враховують впливу теплоти фазових переходів I роду, які супроводжуються поглинанням або виділенням прихованої теплоти і зміною питомого обсягу.

В той же час для оцінки температурного поля академіком М.М. Рикаліним була розроблена загальна теорія розповсюдження тепла при нагріві, результати досліджень за якою показали, що теплота плавлення суттєво впливає на розміри зварювальної ванни та шва. Слід відмітити, що теорія теплових процесів Рикаліна заснована на методі джерел, який є ефективним у тих випадках, коли джерело нагріву зосереджено у невеликому об'ємі елементу, а область поширення теплоти не обмежена [8]. Він надає можливість чисельними методами відшукати швидкості зварювальних напруг та деформацій, але для визначення самих шуканих величин доводиться користуватися формулами чисельного диференціюван-

ня, які вносять додаткові похибки в рішення. При цьому методика розрахунку температурних полів, яка була запропонована Рикалінім не враховує теплоту фазових переходів. Все це дозволило виділити найбільш раціональний підхід, який враховує вищевикладені недоліки і полягає в більш точному описі температурного поля з урахуванням теплоти фазового переходу, в залежності від теплофізичних коефіцієнтів температури, що призводить до постановки задачі Стефана, яку було сформульовано в 70-х роках XIX ст. австрійським інженером-металургом Й. Стефаном.

У такій постановці в роботі [9] досліджено температурне поле при зварювальному нагріві у стик двох тонких пластин постійної товщини і обмежених у розмірі. При дослідженні процесів правлення і зварювання виникає клас задач, що відносять до задач Стефановського типу, але мають ту особливість, що невідома функція, яка описує закон руху поверхні фазового переходу I роду, входить не тільки в умови Стефана, а й у рівняння теплопровідності.

Метою статті є дослідження температурної задачі правки газовим полум'ям деформацій, що виникають після зварювання, у вигляді задачі Стефана з рухомим джерелом тепла та побудова математичної моделі температурного поля нагрівання при правці деформацій, яка враховує теплоту фазового переходу, шляхом введення розподіленого в околиці поверхні розділу фаз джерела тепла.

Викладення основного матеріалу. Задачі типу Стефана належать до класу нелінійних крайових задач для параболічних рівнянь з розривними коефіцієнтами на невідомих рухомих поверхнях. Дослідження коректності таких завдань узагальнені в монографії Л.И. Рубінштейна [12]. Існуючі методи чисельного рішення задачі Стефана можна розбити на дві групи: методи з явним виділенням межі фазового переходу і методи, засновані на заміні еквівалентної задачі теплопровідності з джерелом тепла, пов'язаним з межею фазового переходу. Характерна особливість другої групи методів полягає в тому, що в них рішення задачі відшукується за допомогою однорідної різницевої схеми.

У багатьох математичних моделях при побудові рівнянь теплопровідності просторовий розподіл джерела тепла визначається дельта-функцією Дірака, яка була введена англійським математиком Полем Діраком і згодом названа його ім'ям (δ -функція, δ -функція Дірака). При побудові різницевої схеми вона апроксимується дельтаобразною функцією, що встановлює «розмазування» ентальпії фазового переходу на деяку поверхню розділу фаз. Таким чином, передбачається, що теплота фазового переходу виділяється в деякій околиці поверхні фазового переходу ($T_* - \Delta$, $T_* + \Delta$), де основна передумова при моделюванні фазових перетворень полягає в тому, що фазовий перехід відбувається при заданій постійній температурі фазового переходу першого роду T_* , тобто приймається припущення, що фазовий перехід відбувається, починаючи з температури нижче ніж температура плавлення (кристалізації).

Вплив фазових (структурних) перетворень на залишкові напруги та деформації при зварюванні та виправленні настільки значні, що їх оцінка призводить до великих похибок. В той же час структурні зміни в металі, що відбуваються в процесі газової правки внаслідок більш повільного (в порівнянні з дуговим зварюванням) нагріву зон впливу при газовій правці більше, ніж при дуговому зварюванні. При газовій правці в металі відбуваються фазові структурні зміни на стадії нагрівання в інтервалі температур $A_{c1} \dots A_{c3}$ та більше (для сталі 09Г2С

температура початку фазового перетворення $A_{c1} = 725^{\circ}\text{C}$, температура закінчення перекристалізації $A_{c3} = 860^{\circ}\text{C}$). При цьому температурою нагріву основного металу, яка забезпечить найбільший ефект при правці для низьколегованих марок сталі є $t = 700 \div 750^{\circ}\text{C}$, а максимально допустимою температурою є $t_{max} = 900 \div 950^{\circ}\text{C}$ [11]. Дослідним шляхом встановлено, що для редагування місцевим нагріванням найбільш раціонально застосовувати температуру в межах від 800°C до 850°C [10], яка згідно з нормативною документацією [11] знаходиться в діапазоні від 600°C до 950°C .

До основних температур фазових переходів для сталі 09Г2С відносять:

- *нормалізацію* – область основного металу, в якій утворюється дрібнозерниста структура з найвищими механічними властивостями. Температура коливається від 860°C і вище (перетворення фериту – аустеніт);

- *неповну перекристалізацію* – область основного металу, в якій навколо крупнозернистої структури в результаті перекристалізації утворюється дрібнозерниста. Температура коливається в межах $725 \div 860^{\circ}\text{C}$ (при нагріванні часткове перетворення ферит – аустеніт).

- *рекристалізацію* – частина основного металу, для якої характерним є відновлення форми і розмірів зруйнованих зерен металу, що раніше піддався обробці тиском. Температура коливається в межах $600 \div 725^{\circ}\text{C}$. При цьому нагрів нижче температури 725°C не змінює вихідний фазовий склад сталі, однак при температурі вище 600°C (температура рекристалізації) призводить до зникнення спадкової прокатної структури основного матеріалу і сферитизації форми зерна. У свою чергу кінцева структура зони термічного впливу при правці залежить від швидкості охолодження точок. Це явище відображено в діаграмі анізотермічного розпаду аустеніту (термокінетичної діаграмі) [8].

Нижче представлені матеріали щодо приведення задачі Стефана до задачі теплопровідності з рухомим джерелом тепла при правці дугої газової горілки елементів хребтової балки.

Система координат обрана таким чином, що її початок знаходиться на кромці Z-подібних профілів, вісь Ox_2 скерована вздовж зварного шва, вісь Ox_1 – по кромці Z-подібного профілю перпендикулярно осі Ox_2 . При обліку симетрії відносно осі Ox_1 розглядаємо один Z-подібний профіль $\Omega = \{0 < x_1 < l_1, 0 < x_2 < l_2\}$ (рис. 1). Тоді задача з визначення температурного поля при правці зводиться до вирішення наступної системи рівнянь [9]:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) - \frac{2\alpha}{\delta} (T - T_c) + q, \quad (x_1, x_2) \in \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

де

$$c = \begin{cases} c_1, T < T_* \\ c_2, T > T_* \end{cases}, \quad \lambda = \begin{cases} \lambda_1, T < T_* \\ \lambda_2, T > T_* \end{cases},$$

де $c_1 (c_2)$, $\lambda_1 (\lambda_2)$ – об’ємна теплоємність, коефіцієнт теплопровідності твердої (рідкої) фази відповідно;

α – коефіцієнт теплопередачі;

δ – товщина елементів балки;

T_c – температура середовища при правці (температурах нагріву $650 \div 900^\circ C$, де відбувається неповна рекристалізація, перекристалізація, нормалізація матеріалу рами напіввагона);

T_* – температура фазового переходу,

$$T = T_* ([LgradT], grad\varphi) + L \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0, \quad \varphi(x_1, x_2, t) = 0, \quad t > 0, \quad (2)$$

де L – теплота кристалізації одиниці об’єму матеріалу;

$\varphi(x_1, x_2, t) = 0$ – рівняння контуру області нагріву; g – питомий тепловий потік полум’я горілки,

з граничними умовами:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} + \alpha(T - T_c) = 0, \quad x_1 = 0, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} + \alpha(T - T_c) = 0, \quad x_1 = l_1, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad x_2 = 0, \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} + \alpha(T - T_c) = 0, \quad x_2 = l_2, \quad t > 0, \quad (6)$$

з початковою умовою:

$$T(x_1, x_2, 0) = T_c, \quad (x_1, x_2) \in \Omega. \quad (7)$$

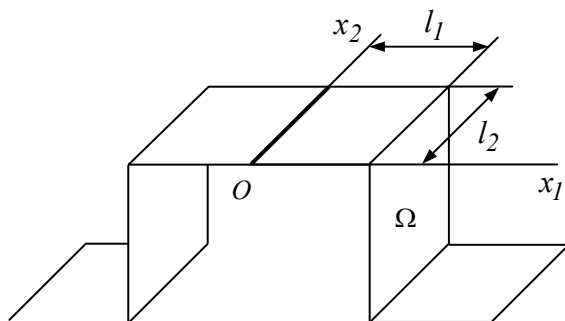


Рис. 1. Система координат для правки хребтової балки напіввагона

В дійсності в ході зварного нагрівання при правці тепловий потік розподілений в деякому компактному просторі, тобто діє розподілене джерело нагріву. Отже для поверхневого джерела нагріву, а саме газового полум'я, експериментально встановлено, що питомий тепловий потік q в будь-якій точці плями нагріву описується кривою Гаусса (закон нормального розподілу) [8] і наближено може бути виражений формулою:

$$q = q_{max} \cdot e^{-Rk^2} . \quad (8)$$

де q_{max} – найбільший тепловий потік в центрі плями нагрівання, $кал/см^2сек$;
 e – основа натурального логарифму;

R – коефіцієнт зосередженості теплового потоку, $1/см^2$ (для газового зварювання коефіцієнт зосередженості $R = 0,3 см^{-2}$ [7]);

k – радіальна відстань точки плями нагріву від осі полум'я, $см$.

У рівнянні (1) вираз $\frac{2\alpha}{\delta}(T - T_c)$ враховує тепловіддачу з обох поверхонь Z – подібних профілів. Граничними умовами третього роду (3), (4), (6) задана умова теплообміну на кромках елементів з навколишнім середовищем. Граничною умовою другого роду (5) задана умова симетрії по осі Ox_1 у будь-який момент часу.

У статті двовимірна задача Стефана (1), (2) з фіксованою температурою фазового переходу T_* приводиться до завдання теплопровідності з джерелом тепла, розподіленим у малій околиці межі розділу фаз, причому вона обирається в області фази, що утворюється. У зв'язку з безперервною зміною положення поверхні фазового переходу, джерело тепла, що вводиться, є рухливим разом з межею розділу фаз.

Для описання джерела тепла введена частково безперервна невід'ємна функція $g(T)$, яка задовольняє наступним умовам:

- $g(T)$ визначена на всьому діапазоні зміни температур, відмінна від нуля в проміжку від T_* до $T_* + \Delta T_*$, а поза ним тотожно дорівнює нулю;
- $g(T) = 1$;
- $\frac{\partial g}{\partial T} < 0$ для $T \in (T_*, T_* + \Delta)$.

Тоді справедливе наступне, сформульована вище задача Стефана (1) – (3) еквівалентна задачі теплопровідності, яка визначається за рівнянням:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) - \frac{2\beta}{\delta} (T - T_c) + q + L \frac{\partial g}{\partial t}, \quad (x_1, x_2) \in \Omega, \quad t > 0, \quad (9)$$

з граничними і початковими умовами початкової задачі (3) – (7).

У свою чергу умова $\frac{\partial g}{\partial T} < 0$ забезпечує позитивність виразу $c - L \frac{\partial g}{\partial t}$. В задачі про плавлення $\frac{dT}{dt} > 0$, тоді $\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{dg}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} < 0$, тобто останній доданок правої частини рівняння (9) означає стікання тепла, що відповідає процесу поглинання теплоти фазового переходу.

За методикою, заснованою на ідеї статті, розглянемо деякий об'єм V , обмежений поверхнею A , який містить у собі поверхню розділу фаз Σ (див. рис. 2).

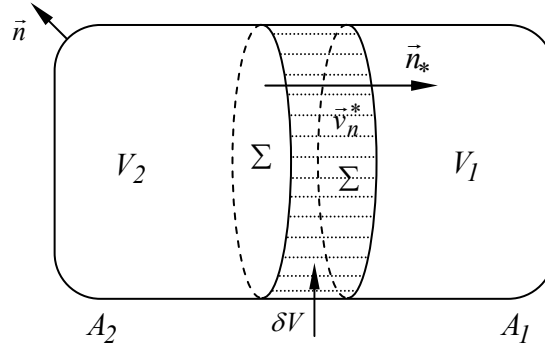


Рис. 2. Об'єм з поверхнею розділу фаз

У момент часу t поверхня розділу фаз Σ розділяє область V на дві під області V_1, V_2 , із зовнішніми поверхнями A_1, A_2 . За деякий приріст часу Δt поверхня розділу фаз Σ проходить через елементарний приріст об'єму δV і займе положення Σ' . При цьому збільшиться об'єм, зайнятий фазою 2 і відповідно зменшиться об'єм фази 1.

Проінтегруємо рівняння (9) по об'єму V скориставшись рівнянням Гаусса – Остроградського

$$\int_V c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_A (\lambda \text{grad} T, \vec{n}) dA + \int_V L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_V \left(f - \frac{2\alpha}{\delta} (T - T_c) \right) dV, \quad (10)$$

де \vec{n} – зовнішня нормаль до поверхні A .

Перетворимо другий інтеграл правої частини (10):

$$\int_V L \frac{\partial g}{\partial t} dV = \int_{V_1} L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_{V_2} L \frac{\partial g}{\partial t} dV = \int_{V_1 - \delta V} L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_{V_2 + \delta V} L \frac{\partial g}{\partial t} dV. \quad (11)$$

Тут інтеграл по області $V_1 - \delta V$ дорівнює нулю за визначенням функції $g(T)$, а другий інтеграл по $V_2 + \delta V$ представимо в наступному вигляді:

$$\int_{V_2+\delta V} L \frac{\partial g}{\partial t} dV = \int_{V_2} L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_{\delta V} L \frac{(g)_{1,t+\Delta t} - (g)_{2,t}}{\Delta t} dV. \quad (12)$$

З визначення функції $g(T)$ виходить, що $(g)_{1,t+\Delta t} = 0$ та $g(T) = 1$ на фазовій поверхні. При $\Delta t \rightarrow 0$ відношення dV / dt прагне до $v_n^* \cdot d\Sigma$, де v_n^* – локальна швидкість елемента $d\Sigma$ по нормалі до неї у бік першої фази. Крім того, об'єм δV при цьому стягується до поверхні Σ , так що областю інтегрування стає Σ . Тоді з двох попередніх співвідношень маємо

$$\int_V L \frac{\partial g}{\partial t} dV = \int_{V_2} L \frac{\partial g}{\partial t} dV - \int_{\Sigma} L \cdot v_n^* dV, \quad (13)$$

Напишемо співвідношення (10) для кожної фази:

$$\int_{V_1} c_1 \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_{A_1+\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_1 dA + \int_{V_1} L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_{V_1} \left(f_1 - \frac{2\alpha}{\delta} (T - T_c) \right) dV, \quad (14)$$

$$\int_{V_2} c_2 \frac{\partial T}{\partial t} dV = \int_{A_2+\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_2 dA + \int_{V_2} L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_{V_2} \left(f_2 - \frac{2\alpha}{\delta} (T - T_c) \right) dV. \quad (15)$$

У рівнянні (14) другий доданок правої частини дорівнює нулю, а в рівнянні (15) аналогічний член замінимий його значенням з (13). Потім підсумовуючи отримані співвідношення будемо мати такі рівняння

$$\begin{aligned} \int_V c \frac{\partial T}{\partial t} dV &= \int_A (\lambda \text{grad} T, \vec{n}) dA + \int_{\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_1 d\Sigma + \int_{\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_2 d\Sigma + \\ &+ \int_V L \frac{\partial g}{\partial t} dV + \int_{\Sigma} L \cdot v_n^* d\Sigma + \int_V \left(f - \frac{2\alpha}{\delta} (T - T_c) \right) dV. \end{aligned} \quad (16)$$

Тепер віднімаючи (10) з отриманого співвідношення, прийдемо до рівняння

$$\int_{\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_1 d\Sigma + \int_{\Sigma} (\lambda \text{grad} T, \vec{n})_2 d\Sigma + \int_{\Sigma} L \cdot v_n^* d\Sigma = 0. \quad (17)$$

Якщо локальну нормаль до Σ , скеровану в бік першої фази, позначити через \vec{n}_* , то в першому інтегралі $\vec{n} = -\vec{n}_*$, а в другому $\vec{n} = \vec{n}_*$. Тоді попереднє рівняння запишеться у вигляді:

$$\int_{\Sigma} \left[(\lambda \text{grad} T)_2 - (\lambda \text{grad} T)_1, \vec{n}_* \right] + L \cdot v_n^* d\Sigma = 0. \quad (18)$$

Звідси через довільність об'єму V і відповідної поверхні Σ випливає

$$([\text{grad}T], \vec{n}_*) + L \cdot \nu_n^* = 0$$

яке з урахуванням співвідношень

$$\nu_n^* = \frac{1}{|\text{grad}\Phi|} \left(\frac{d\vec{R}}{dt}, \text{grad}\Phi \right), \quad \vec{n}_* = \frac{\text{grad}\Phi}{|\text{grad}\Phi|}, \left(\frac{d\vec{R}}{dt}, \text{grad}\Phi \right) + \frac{\partial\Phi}{\partial e} = 0,$$

дає умову (2). В останньому рівнянні $\vec{r} = \vec{R}(t)$ – радіус-вектор точки, що знаходиться на поверхні фазового переходу.

Перевірка адекватності отриманої математичної моделі виконується за допомогою чисельних розрахунків задачі нагріву елементів вагона при правці, які наведені нижче. Для чисельного вирішення рівнянь (9), (3) – (7) застосуємо метод згладжування. Коефіцієнти рівняння (9), як функції температури, зазнають розриви при $T = T_*$ і не визначені в цій точці. Останній член правої частини об'єднаємо з лівою частиною, тоді ефективна теплоємність $c - Ldg/dT$ має розриви в точках $T = T_*$ та $T = T_* + \Delta$. Виходячи з цього, рівняння (9), (3) – (7) будуть мати наступний вигляд

$$\begin{aligned} \tilde{c} \frac{\partial T}{\partial t} &= \text{div}(\tilde{\lambda} \text{grad}T) - \frac{2\delta}{\delta} (T - T_c) + q, \quad (x_1, x_2) \in \Omega, \quad t > 0, \\ -\tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x_1} + \alpha(T - T_c) &= 0, \quad x_1 = 0, \quad t > 0, \\ \tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x_1} + \alpha(T - T_c) &= 0, \quad x_1 = l_1, \quad t > 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x_2} &= 0, \quad x_2 = 0, \quad t > 0, \\ \tilde{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x_2} + \alpha(T - T_c) &= 0, \quad x_2 = l_2, \quad t > 0, \\ T(x_1, x_2, 0) &= T_c, \quad (x_1, x_2) \in \Omega. \end{aligned}$$

коефіцієнти якої визначені у всьому діапазоні зміни температури таким чином

$$\tilde{c} = \begin{cases} c_1, & \text{якщо } T < T_*, \\ 0,5 \left(\lim_{T \rightarrow T_* - 0} c_1 + \lim_{T \rightarrow T_* + 0} c_2 - L \frac{dg}{dT} \right), & \text{якщо } T = T_*, \\ c_2 - L \frac{dg}{dT}, & \text{якщо } T_* < T \leq T_* + \Delta, \\ c_2, & \text{якщо } T > T_* + \Delta, \end{cases}$$

$$\tilde{\lambda} = \begin{cases} \lambda_1, & \text{якщо } T \leq T_* - \Delta, \\ \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) - (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T - T_*)}{2 \Delta}, & \text{якщо } T_* - \Delta \leq T \leq T_* + \Delta, \\ \lambda_2, & \text{якщо } T > T_* + \Delta. \end{cases}$$

Для коефіцієнта теплопровідності прийнята апроксимація безперервною функцією. При цьому його можна довізначити аналогічно теплоємності. Оскільки температурне поле є найбільш чутливим до величини коефіцієнта теплоємності, то він повинен при до визначені найбільш точно відповідати реальному процесу фазового переходу. При виборі функції $g(T)$ необхідно враховувати напрям ходу процесу – фазовий перехід відбувається в результаті пониження температури або її підвищення. Вона має бути вибрана відмінною від нуля в області фази, що знов утворюється.

З метою перевірки достовірності (валідації) розробленої розрахункової математичної моделі використовувалися літературні дані наведені в роботах [2,7,8,12-15]. На рис. 3 наведені розрахункові дані щодо розподілів температури в хребтовій балці з маловуглецевої сталі (345-09Г2С-14, ГОСТ 5267.0-90) товщиною 10 мм в різні моменти часу від початку нагріву правки. При цьому радіус плями нагріву обраний рівним 10 мм, ефективна потужність джерела нагріву – 245 Дж/с, час нагріву – 30 с. На рис. 4 та рис. 5 представлені розрахункові та експериментальні дані щодо розподілу температури в хребтовій балці на відповідних відстанях R від центра її нагріву.

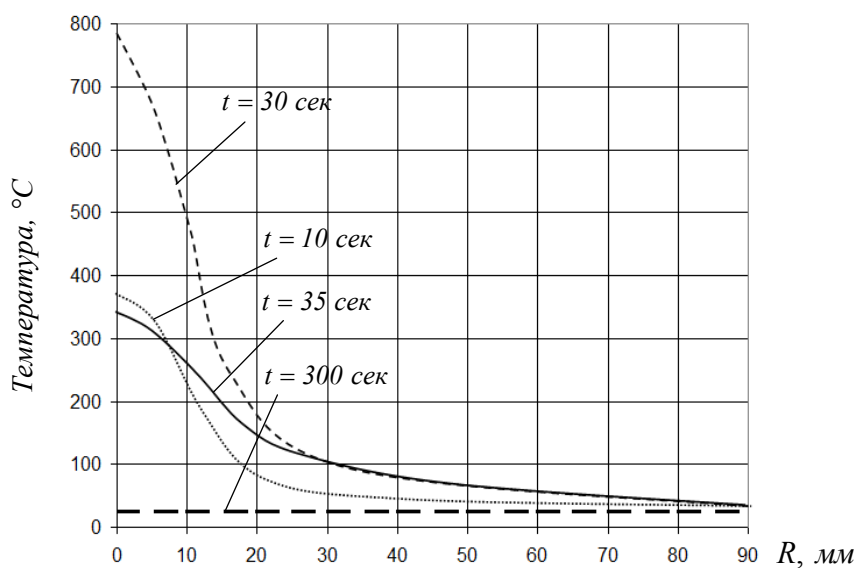


Рис. 3. Розподіл температури в хребтовій балці

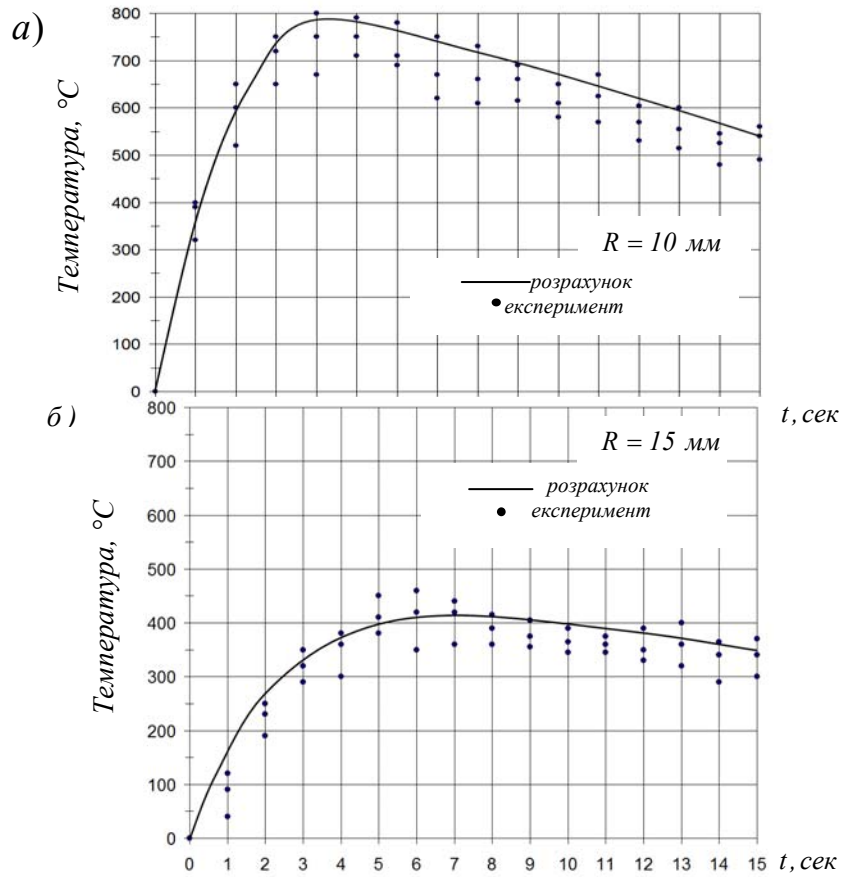
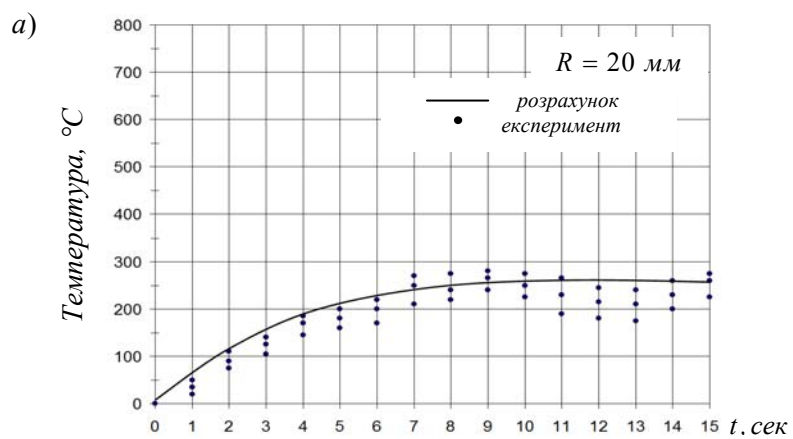


Рис.4. Кінетика розрахункових і експериментальних значень температури на відстанях 10 мм (а) та 15 мм (б) від центру нагріву балки



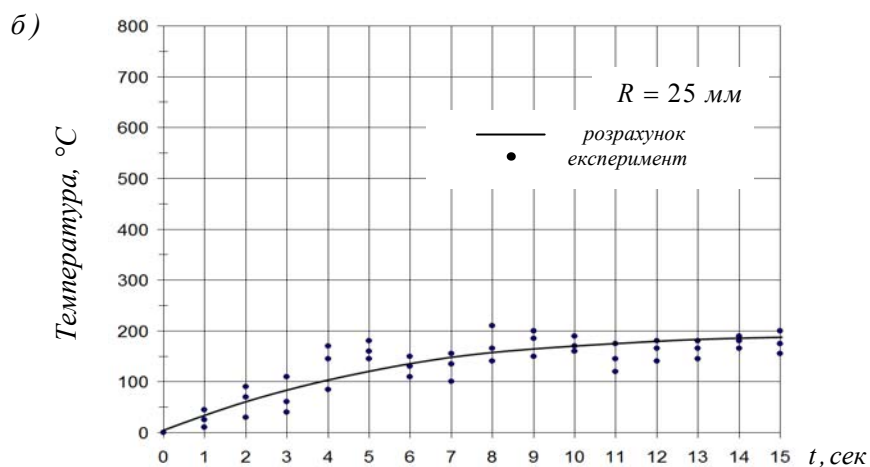


Рис.5. Кінетика розрахункових і експериментальних значень температури на відстанях 20 мм (а) та 25 мм (б) від центру нагріву балки

Висновки і перспективи подальшого використання. Побудована в статті математична модель температурного поля правки у постановці задачі Стефана дозволяє більш точно виконувати описання теплового процесу при правці, який враховує вплив фазового переходу та залежність теплофізичних коефіцієнтів від температури. Виявлені недоліки застосування математичного апарату для чисельного розрахунку температурних полів, який було запропоновано М.М. Рикаліним. Відмічено, що одним з раціональних підходів, який враховує виявлені недоліки і полягає в більш точному описі температурного поля з урахуванням теплоти фазового переходу, в залежності від теплофізичних коефіцієнтів температури є підхід заснований на вирішенні температурної задачі правки газовим полум'ям деформацій, що виникають після зварювання. Дана задача представляється у вигляді задачі Стефана і вирішується за допомогою методу згладжування із застосуванням функції Дірака.

Наведена побудована авторами математична модель температурного поля нагрівання при правці деформацій, яка враховує теплоту фазового переходу, за рахунок введення розподіленого в околиці поверхні розділу фаз джерела тепла. Представлені розрахункові та експериментальні дані щодо розподілу температури в хребтовій балці на відповідних відстанях від центра її нагріву. Відмічено, що за рахунок оптимізації параметрів нагріву можливо суттєво підвищити ефективність термічної правки, що призведе до суттєвої економії енерго- і працевитрат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фомін, О.В. Дослідження дефектів та пошкоджень несучих систем залізничних напіввагонів: монографія / О. В. Фомін. – Київ: ДЕТУТ, 2014. – 299 с.
2. Бурлуцький, О. В. Визначення зварювальних деформацій які виникають під час життєвого циклу напіввагона / О.В. Бурлуцький, Н.С. Кочешкова // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 92-101.
3. Фомін, О.В. Визначення перспективних напрямків проектування несучих систем у вантажному вагонобудуванні [Текст] / О.В. Фомін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – № 3/7(57), 2012. – С. 32-35 – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf).

4. Фомін, О.В. Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції [Текст] / О.В. Фомін // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №3. – С.68-76 – Режим доступу: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukreat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>
5. Приходько, В.И. Комплексная механизация и автоматизация производственных процессов в вагоностроении / В.И. Варетник. – Х.: Прапор, 1996. – 262 с.
6. Цыган, Б.Г. Вагоностроительные конструкции. Изготовление, модернизация, ремонт: монография / Б.Г. Цыган, А.Б. Цыган. – Кременчуг: Издательство «Кременчуг», 2005. – 752 с.
7. Burlutskiy, O.V. Application methods changes plastic deformation after welding sill gondola cars / O.V. Burlutskiy // Metallurgical and mining industry (Machine building). – Dnipropetrovsk, 2015. – No.10. – P. 190-197. (www.metaljournal.com.ua).
8. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 295 с.
9. Bergmann, H.W. Numerical simulation of centre line not cracks in laser beam welding of aluminium close to the sheet edge / H.W. Bergmann, R.M. Hilbinger // Mathematical Modeling of Weld Phenomena. – London: The Institute of Materials, ION Communications Ltd, 1998. – P. 658–668.
10. Рубинштейн, Л.И. Проблема Стефана / Л.И. Рубинштейн. – Рига: Звайгзне, 1967. – 458 с.
11. ГОСТ 24.050.34-84 Проектирование и изготовление стальных сварных конструкций вагонов. Технические требования. – Введ. 1988–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 183 с.
12. Варетник, Л.Д. Правка сварных конструкций / Л.Д. Варетник. – Х.: Прапор, 1966. – 50 с.
13. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич. – М: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
14. Фомін, О.В. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів / О. В. Фомін, О. А. Логвіненко, Р. Ю. Дьомін, В. В. Фомін, Г. П. Бородай, О. В. Бурлуцький // Залізничний транспорт України. – Київ: ДП «ДНДЦ УЗ», 2013. – № 5/6(102/103). – С. 95-104.
15. Бурлуцький, О.В. Особливості методу визначення динамічного навантаження кузова напіввагону / О. В. Бурлуцький // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – Х.: ПП «Технологічний центр», 2012. – Вип. 4/7. – С. 47-50.

Oleksii V. Burlutskiy

(ingeneer of «Mechanics and designing machines», Ukrainian State University of Railway Transport)

Alexander A. Logvinenko, PhD (Technical Sciences), Associate Professor

(Associate Professor of «Mechanics and designing machines», Ukrainian State University of Railway Transport)

THE USE OF MATHEMATICAL MODELING CHANGES IN THE MANUFACTURE OF GONDOLA

The urgency of the research and development activities aimed at the study of the temperature problem of flame straightening deformations that occur after welding the frame gondola, in the form of the Stefan problem with moving heat source. It noted the desirability of developing a mathematical model of heating a metal that occurs when straightening strains, which takes into account the heat of phase transition, by entering, distributed in the vicinity of the surface of the interface, the heat source. The results of experimental and theoretical research on the temperature distribution in the revision sill gondola depending on the heating time.

Keywords: gondola, sill, deformation, correction, mathematical model.

REFERENCES

1. Fomin O.V. *Doslidzhennia defektiv ta poskodzen nesuchykh system zaliznychnyh napivvagoniv* [Study of defects and damage of bearing systems of railway gondola cars]. Kiev, State Economic and Technological University of Transport Publ., 2014. 299 p.
2. Burlutskiy O.V., Kocheshkova N.S. Vyznachennia zvariuvannykh deformatsii yaki vynykaiut pid chas zhyttievogo tsykladu napivvagona [Determination of welding deformations that occur during the life cycle of the gondola]. *Zbirnyk naukovykh prats derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universytetu transportu* [collection of scientific papers State Economic and Technological University of Transport], Kiev, 2015, issue 25-27, pp. 92-101.
3. Fomin, A. V. The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building [Text]/ A. V. Fomin// East European journal of advanced technologies. – Kharkiv. –№ 3/7(57), 2012. – 32-35 p. – access Mode: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf).
4. Fomin, A. V. Increasing the degree of ideality of freight wagons and forecasting stages of their evolution [Text]/ A. V. Fomin, // Scientific Bulletin of National mining University. – Dnepropetrovsk: NMU, 2015. – No. 3. – P. 68-76 – Mode of access: <http://nvnngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukrcat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnicha-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>.
5. Prihodko V.I. *Kompleksnaya mehanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsesov v vagonostroenii* [Complex mechanization and automation of production processes in car building]. Kharkiv, Prapor Publ., 1996. 262 p.
6. Tsygan B.G. *Vagonostroitelnyye konstruksii. Izgotovleniye, modernizatsiya, remont* [Railcar construction. Production, modernization, repair]. Kremenchug, Kremenchug Publ., 2005. 752 p.
7. Burlutskiy O.V. Application methods changes plastic deformation after welding sill gondola cars / O.V. Burlutskiy // *Metallurgical and mining industry (Machine building)*. – Dnipropetrovsk, 2015. – No.10. – P. 190-197. (www.metaljournal.com.ua).
8. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes in welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951. 295 p.
9. Bergmann H.W. *Numerical simulation of centre line not cracks in laser beam welding of aluminium close to the sheet edge* / H.W.Bergmann, R.M. Hilbinger // *Mathematical Modeling of Weld Phenomena*. – London: The Institute of Materials, IOH Communications Ltd, 1998. – P. 658–668.
10. Rubinshteyn L.I. *Problema Stefana* [Stefan problem]. Riga, Zvaygzne, 1967. 458 p.
11. *OST 24.050.34-84 Proektirovanie i izgotovlenie stalnykh svarnykh konstruksiy vagonov. Tehnicheskie trebovaniya*. [Industry standard 24.050.34-84. Design and production of steel welded structures wagons. Technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 1988. 183 p.
12. Varetnik L.D. *Pravka svarnykh konstruksiy* [Edit weldments]. Kharkiv, Prapor Publ., 1966. 50 p.
13. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 784 p.
14. Fomin O.V., Logvinenko O.A., Domin R.Yu., Fomin V.V., Boroday G.P., Burlutskiy O.V. Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykiv bazovykh nesuchih elementiv kuzoviv napivvagoniv [Mathematical models of the main indicators of change in the basic elements of gondolas carrying bodies]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2013, issue 5/6(102/103), pp. 95-104.
15. Burlutskiy O.V. Osoblyvosti metodu vyznachennia dynamichnogo navantazhennia kuzova napivvagonu [Features of the method for determining the dynamic load of the body gondola]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy – Eastern European advanced technology magazine*, 2012, issue 4/7, pp. 47-50.