

УДК 621.645: 519.63

Цибрій¹ Ю.О., Грабовський² Г.Г., д.т.н., проф.

1 - НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна;

2 - ДНВК «Київський інститут автоматики», м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР ТИТАНОВОГО РОЗПЛАВУ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО ТЕЧІЇ

Tsybrii I., Grabovskij G.

1 - National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (tsybriii@ukr.net);2 - State Scientific and Production Corporation «Kyiv Institute of automatics», Kyiv, Ukraine (grabovskiv@voliacable.com)

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN TITANIUM MELT CONSIDERING ITS FLOW

Розроблено математичну модель обігріву титанового розплаву в проміжній ємності електронно-променевої установки з урахуванням гідродинаміки його течії. На основі цієї моделі з використанням програми скінченно-елементного аналізу ANSYS Fluent отримано розподіл температур в проміжній ємності при різних швидкостях течії розплаву. Встановлено, що температура розплавленого металу в центральній зоні проміжної ємності суттєво перевищує його температуру в периферійній зоні, зростання швидкості течії розплаву призводить до зменшення температури та збільшення ступеня рівномірності розподілу температур в проміжній ємності. Запропоновано оптимальний діапазон швидкостей течії розплаву з метою забезпечення необхідного рівня температури та її рівномірності розподілу в проміжній ємності.

Ключові слова: електронно-променева плавка, проміжна ємність, розподіл температур, титановий розплав

Вступ

Сучасна техніка потребує використання в виробі машинобудування нових технологічних матеріалів, які володіють високою питомою міцністю в широкому спектрі температур експлуатації, стійкістю до агресивних середовищ, немагнітністю та рядом інших специфічних властивостей. Такими матеріалами є сплави на основі титану [1, 2, 3]. Титанові зливки отримуються за допомогою вакуумного дугового, електрошлакового та індуктивного переплаву [4]. Головним недоліком вищенаведених методів є необхідність багаторазового переплаву вихідного шихтового матеріалу для отримання сплаву необхідної чистоти [1...4].

Прогресивним методом отримання високоякісних зливок титанових сплавів з необхідним хімічним складом, в якому відсутній вищенаведений недолік, є метод електронно-променевої плавки (ЕПП) [1, 2]. Такий метод також не має жорстких вимог до хімічного складу та типу шихтового матеріалу [4, 5]. Однак, до недоліків методу ЕПП можна віднести недостатній рівень автоматизації систем керування електронно-променевими гарматами. Даний недолік призводить до неефективного використання потужностей ЕПУ та збільшення тривалості технологічного процесу наплавлення зливку, а також інтенсивного випаровування легуючих домішок при перегріві розплавленого титану (на рис. 1 яскраві зони – перегріті, темні – недогріті).

Для підвищення рівня автоматизації керування потужностями електронно-променевих гармат необхідно вирішити ряд питань, одним з яких є визначення розподілу температур розплаву в проміжній ємності.

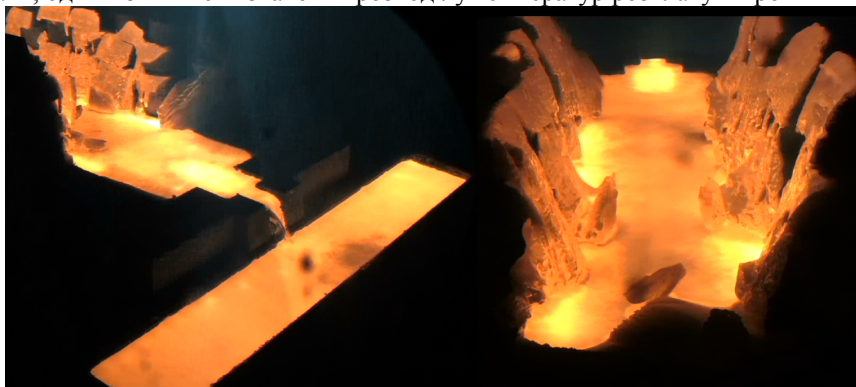


Рис. 1. Нерівномірно прогріте дзеркало розплаву в проміжній ємності та кристалізаторі

Метою дослідження є складання математичної моделі обігріву титанового розплаву в проміжній ємності ЕПУ з урахуванням гідродинаміки його течії та аналіз впливу швидкості течії розплаву в проміжній ємності на рівномірність розподілу температур в розплавленому металі.

Розробка математичної моделі

Досліджуємо теплові і гідродинамічні процеси, які відбуваються в проміжній ємності. Схема теплових процесів в проміжній ємності представлена на рис. 2.

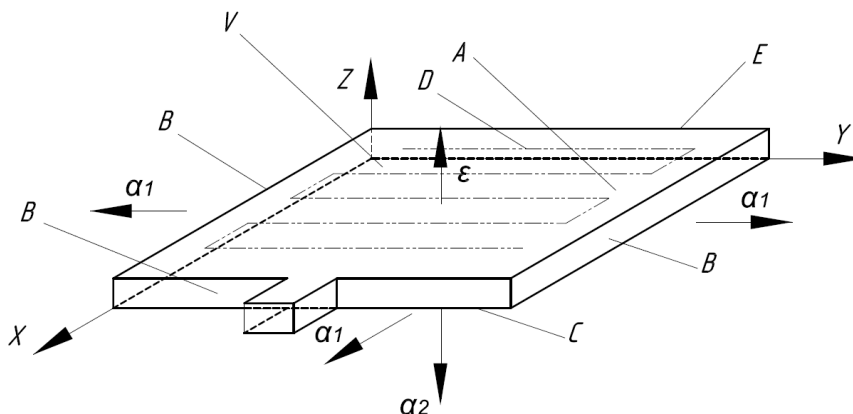


Рис. 2. Схема теплових процесів в проміжній ємності

Теплообмін в проміжній ємності V може бути описаний за допомогою рівняння теплопровідності. Теплофізичні властивості розплаву: коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К); питома ізобарна теплоємність c_p , Дж/(кг·К) та густина ρ , кг/м³. В початковий момент часу $t = 0$ температура розплаву в проміжній ємності і навколишньому середовищі дорівнює T_0 і T_c . На поверхні проміжної ємності A відбувається нагрів скануючим електронним променем з питомою потужністю q в деякій заданій області D ($D \subset A$). З поверхні A відбувається радіаційне випромінювання в навколишнє середовище. Степінь чорноти розплаву титану ε . На бокових гранях B і на дні C відбувається конвективний теплообмін зі стінками проміжної ємності, які мають коефіцієнти тепловіддачі і температури α_B, α_C , Вт/(К·м²) та T_B, T_C , К відповідно. На грані E температура приймається рівній температурі розплавленого металу в початковий момент часу T_0 і теплообмін з зовнішнім середовищем не відбувається, тобто $\alpha_E = 0$. Необхідно визначити температуру T в кожній точці проміжної ємності $(x, y, z) \in V$ в кожен момент часу $t > 0$.

Рівняння теплопровідності, яке враховує вплив течії розплаву можна записати в наступному вигляді [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \Bigg|_{t>0}, (x, y, z) \in V, \quad (1)$$

де u, v, w - компоненти вектора швидкості середовища точки x, y, z .

Початкові умови для задачі теплообміну:

$$T_{t=0} = T_0. \quad (2)$$

Запишемо граничні умови задачі теплообміну на гранях області V :

- на поверхні обігріву розплаву електронним променем (поверхня D):

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Bigg|_{(x,y,z) \in D} = q - \varepsilon \sigma \left(T^4 \Big|_{(x,y,z) \in D} - T_c^4 \right), \quad (3)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постійна Стефана-Больцмана.

- на поверхні розплаву A/D :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Bigg|_{(x,y,z) \in A/D} = \varepsilon \sigma \left(T^4 \Big|_{(x,y,z) \in D} - T_c^4 \right); \quad (4)$$

- на бокових гранях B :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Bigg|_{(x,y,z) \in B} = \alpha_B \left(T \Big|_{(x,y,z) \in D} - T_B \right); \quad (5)$$

де n - одинична нормаль до грані B , яка направлена в навколишнє середовище;

- на грані C :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in B} = \alpha_C (T|_{(x,y,z) \in C} - T_C); \quad (6)$$

- на грані E :

$$T|_{(x,y,z) \in E} = T_0. \quad (7)$$

Розглянемо стаціонарну течію розплаву в проміжній ємності (рис. 3). Рідина поступає в проміжну ємність через грань E , а витікає через грань H . Розплав поступає в проміжну ємність через грань E зі швидкістю u_0 . Фізичні властивості розплаву: густина ρ , кг/м^3 та динамічна в'язкість μ , Па·с.

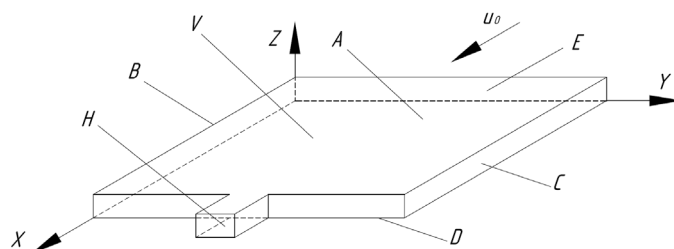


Рис. 3. Схема проміжної ємності при постановці гідродинамічної задачі

Течія розплаву в проміжній ємності описується системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для стаціонарного випадку з урахуванням гравітації і рівнянням нерозривності середовища [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial z} = g\rho - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta w \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де p - тиск в точці x, y, z ; Δ - оператор Лапласа.

До системи рівнянь (8) додамо граничні умови:

- на поверхні A , враховуючи, що в плавильній установці вакуум, тиском можна знехтувати, а течія вздовж осі Z не відбувається:

$$p|_A = 0, \quad w|_A = 0; \quad (9)$$

- на гранях B, C, D течія відсутня:

$$\begin{cases} u|_B = 0, & v|_B = 0, & w|_B = 0, \\ u|_C = 0, & v|_C = 0, & w|_C = 0, \\ u|_D = 0, & v|_D = 0, & w|_D = 0. \end{cases} \quad (10)$$

- через грань E рідина тече з постійною швидкістю u_0 вздовж осі x :

$$u|_E = u_0, \quad v|_E = 0, \quad w|_E = 0; \quad (11)$$

- на грані H приймаємо тиск нульовим і течія здійснюється тільки вздовж осі x :

$$p|_H = 0, \quad v|_H = 0, \quad w|_H = 0. \quad (12)$$

Рівняння (1) та система рівнянь (8) разом з граничними умовами (4) - (7) та (9) - (12) утворюють математичну модель обігріву титанового розплаву в проміжній ємності ЕПУ з урахуванням гідродинаміки його течії.

Моделювання та аналіз теплових процесів

На основі складеної математичної моделі було проведено моделювання розподілу температур в проміжній ємності ЕПУ з урахуванням течії розплаву за допомогою програмного пакету скінченно-елементного аналізу ANSYS Fluent.

Параметри моделі відповідають реальним умовам нагріву розплаву в ЕПУ ТІСО-15М [7]. При моделюванні були прийняті наступні постійні величини: $\lambda = 20$ Вт/(м·К); $c_p = 640$ Дж/(кг·К); $\rho = 4120$ кг/м³; $T_0 = 1950$ К; $T_B = 1000$ К, $T_C = 1000$ К; $\alpha_B = \alpha_C = 1000$ Вт/(К·м²); $q = 3 \cdot 10^6$ Вт/ м²; $\varepsilon = 0,3$; $u_0 = 0.003$ м/с; розміри проміжної ємності $a \times b \times c = 400 \times 300 \times 30$ мм; розміри зливного носка $a_1 \times b_1 \times c_1 = 50 \times 50 \times 30$ мм.

Область нагріву D представлена на рис. 4 [8].

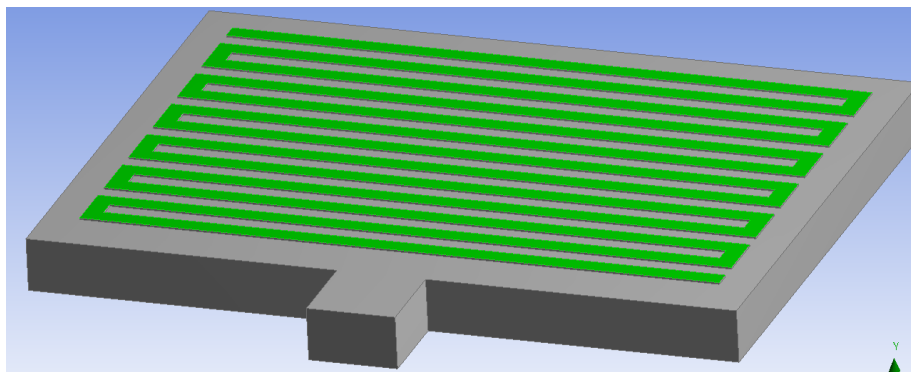


Рис. 4. Траєкторія руху електронного променя по поверхні проміжної ємності

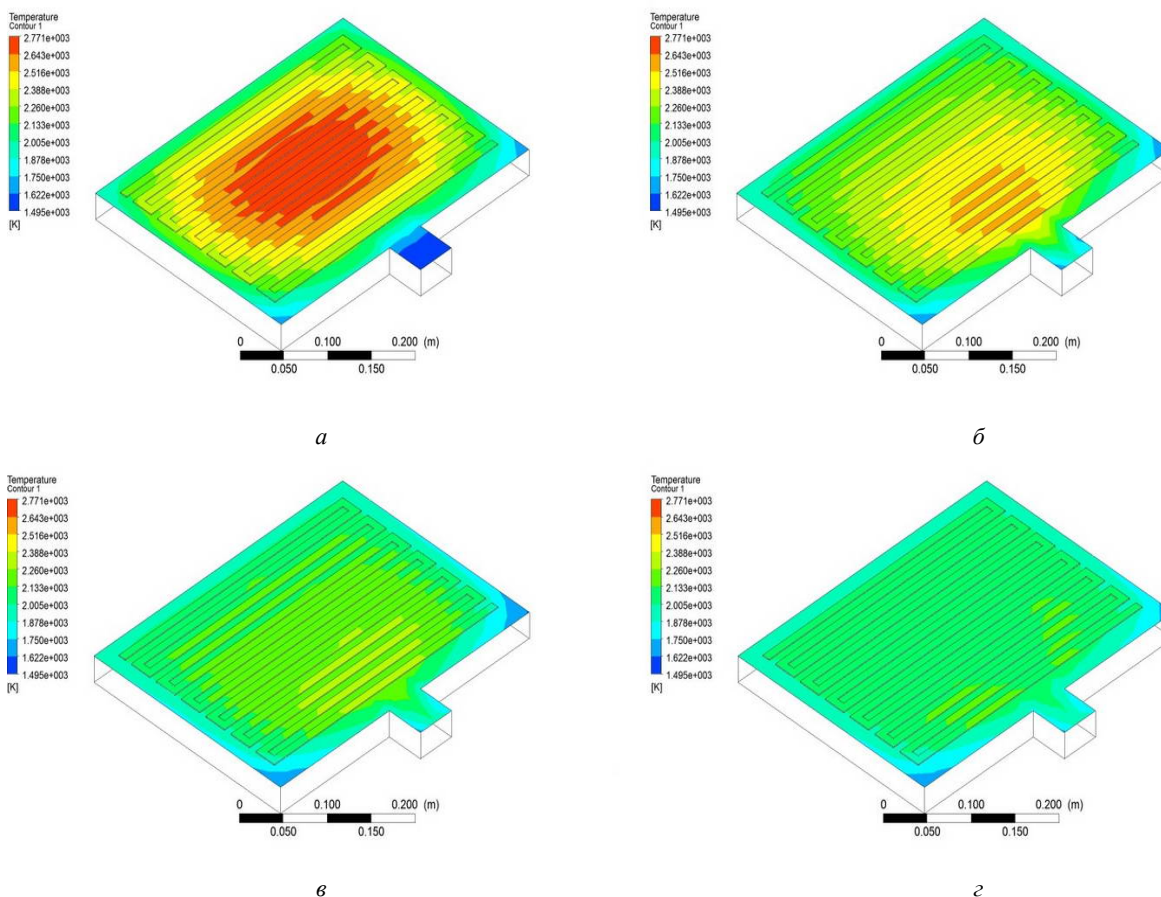


Рис. 5. Розподіл температур розплаву на поверхні проміжної ємності при різних початкових швидкостях його течії: а) $u_0 = 0$ м/с; б) $u_0 = 0,003$ м/с; в) $u_0 = 0,01$ м/с; г) $u_0 = 0,05$ м/с

На початку було змодельовано розподіл температур при різних швидкостях течії розплаву в проміжній ємності. Результат представлений на рис. 5. Як видно, зі збільшенням швидкості течії температура розплаву знижується, але температура розподіляється більш рівномірно. Так при відсутності течії (рис. 5,а) в центральній

зоні метал буде досягати недопустимих значень температури [1, 5]. При швидкості течії розплаву $u_0 = 0,003$ м/с (рис. 5, б), розплав прогривається в необхідному температурному діапазоні [1]. При підвищенні швидкості течії (рис. 5, в, г) розплав не встигає прогрітись до необхідних температур рафінування, а поблизу водоохолоджуваних мідних стінок може почати кристалізуватися в результаті теплообміну з ними, що є недопустимим. Отриманий результат підтверджується практикою експлуатації ЕПУ ТІСО-15М. Тому для технологічно процесу виплавки титанових зливок на промисловій ЕПУ ТІСО-15М рекомендовано такі режими подачі шихтового матеріалу в зону плавки, щоб вагова витрата розплаву відповідала швидкості $u_0 = 0,003 \div 0,005$ м/с.

Було змодельовано розподіл швидкостей та температур в проміжній ємності при початковій швидкості течії розплаву $u_0 = 0,003$ м/с (рис. 6-9). Після потрапляння в проміжну ємність течія розплаву характеризується рівномірним розподілом швидкостей. При проходженні половини довжини проміжної ємності траєкторія течії розплаву стає криволінійною, швидкість зростає, що є результатом течії розплаву через вузький носок проміжної ємності.

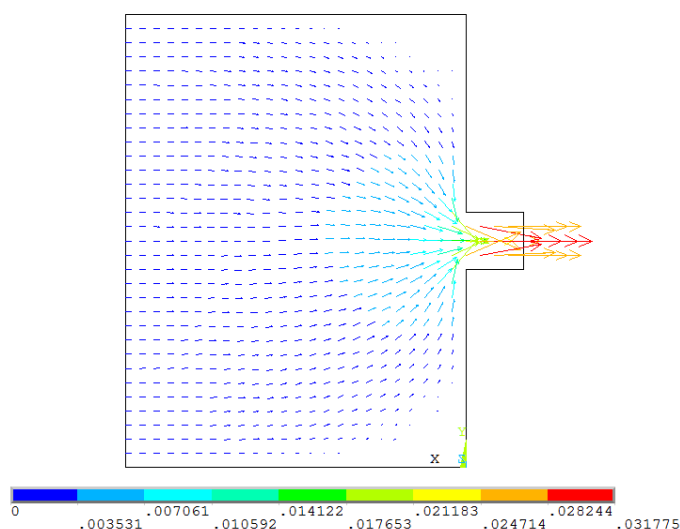


Рис. 6. Розподіл швидкостей течії розплаву в проміжній ємності

По отриманим розподілам температур на дні проміжної ємності (рис. 7, а), на глибині 15 мм (рис. 7, б) та на поверхні (рис. 7, в) можна зробити висновок про значну нерівномірність прогріву рідкого металу по всьому об'єму. Також течія розплаву приводить до витягування температурного поля в напрямку носка ємності. З розподілу температур представлених на рис. 8 та рис. 9 видно, що на периферії температура розплаву значно нижча за температури в центральній області. Отриманий результат пояснює утворення гарнісажу на стінках проміжної ємності.

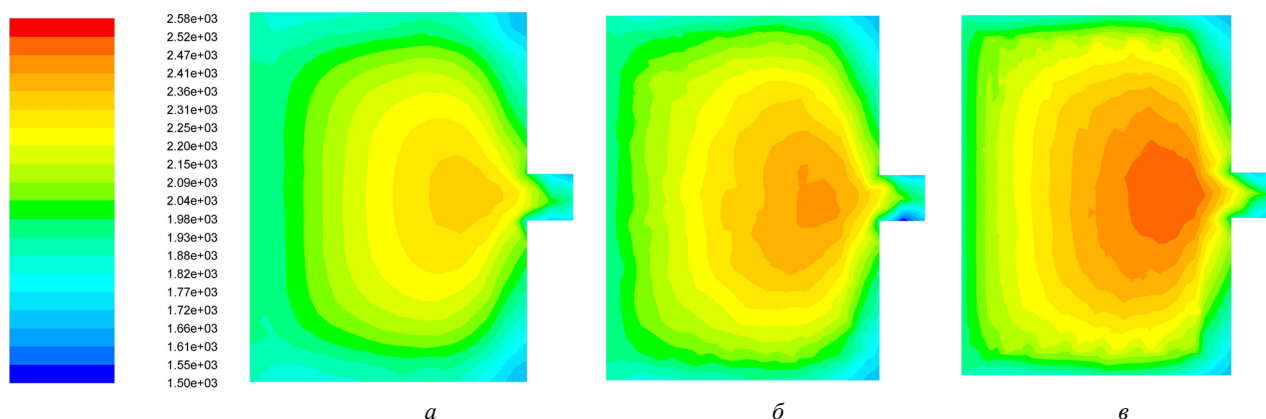


Рис. 7. Розподіл температур титанового розплаву в проміжній ємності паралельно площині xOy : а) $z = 0$; б) $z = 15$ мм; в) $z = 30$ мм

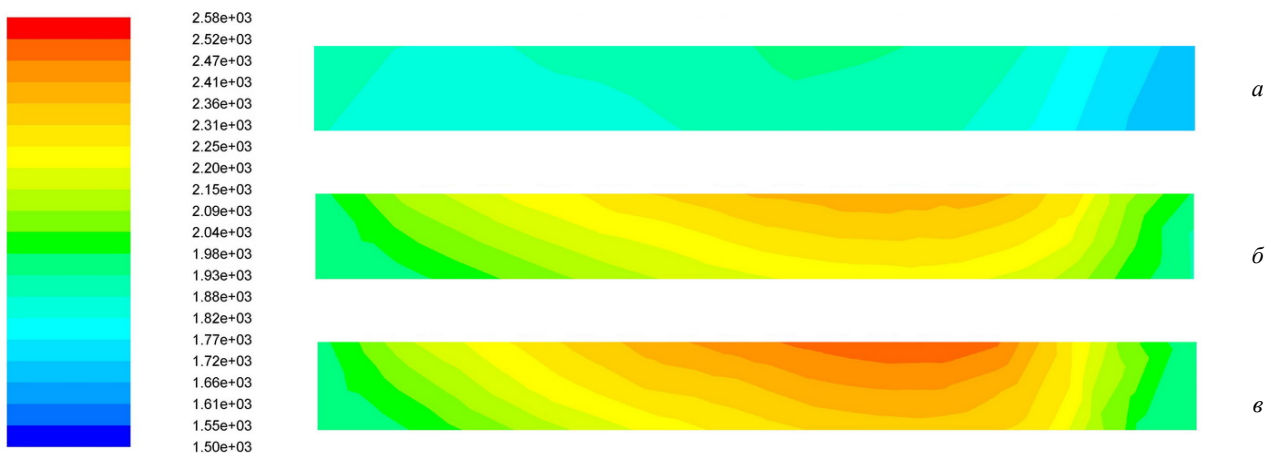


Рис. 8. Розподіл температур титанового розплаву в проміжній ємності паралельно площині $x0z$: а) $y = 0$ мм; б) $y = 100$ мм; в) $y = 200$ мм

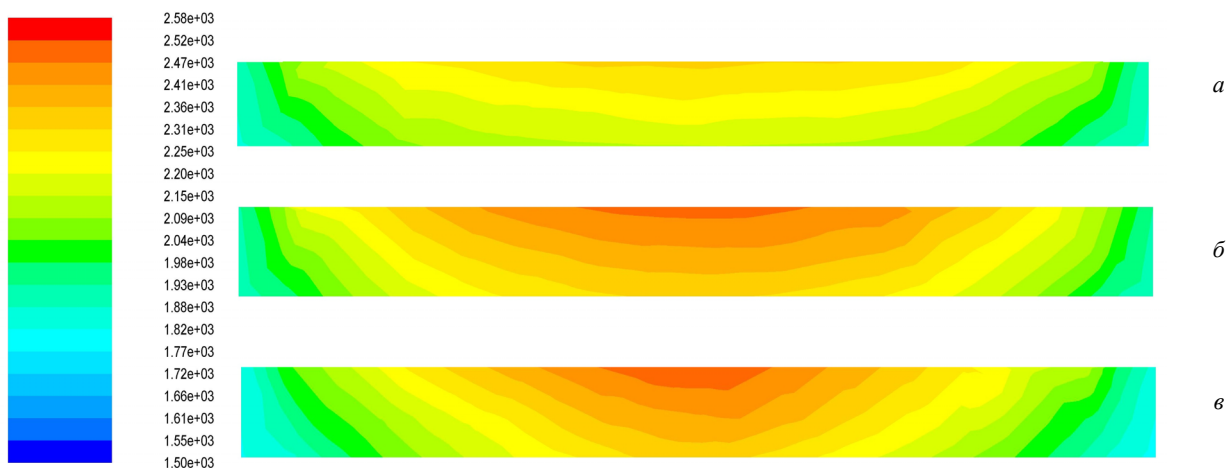


Рис. 9. Розподіл температур титанового розплаву в проміжній ємності паралельно площині $y0z$: а) $x = 100$ мм; б) $x = 200$ мм; в) $x = 300$ мм

Висновки

Складена математична модель обігріву титанового розплаву в проміжній ємності ЕПУ з урахуванням гідродинаміки його течії, яка дозволяє визначити розподіл швидкостей та температур в проміжній ємності. За допомогою програмного пакету скінченно-елементного аналізу ANSYS Fluent проведено моделювання, отримано розподіл температур для стаціонарного режиму при різних швидкостях течії титанового розплаву.

Показано, що зі збільшенням швидкості течії титанового розплаву його температура зменшується, температура розподіляється більш рівномірно. Течія розплаву приводить до витягування температурного поля в напрямку носка ємності.

Для подальшого моделювання вибрана швидкість $u_0 = 0,003$ м/с, оскільки при такій швидкості течії розплав встигає прогрітися до необхідних температур у всьому об'ємі в ЕПУ ТІСО-15М. Отримано розподіл температур в об'ємі проміжної ємності при обраній швидкості.

Очікується, що отримані результати будуть корисні при розробці системи визначення температурних полів на поверхні проміжної ємності, прогнозуванні на основі отриманого теплового розподілу та за допомогою створеної моделі температур в усьому об'ємі проміжної ємності та створенні алгоритмів керування електронно-променевими гарматами з урахуванням отриманого теплового розподілу в досліджуваному об'ємі.

Анотація. Разработана математическая модель обогрева титанового расплава в промежуточной емкости электронно-лучевой установки с учетом гидродинамики его течения. На основе этой модели с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS Fluent получено распределение температур в промежуточной емкости при различных скоростях течения расплава. Установлено, что температура расплавленного металла в центральной зоне промежуточной емкости существенно превышает его температуру в периферийной зоне, увеличение скорости течения

расплава приводит к уменьшению температуры и увеличению степени равномерности распределения температур в промежуточной емкости. Предложено оптимальный диапазон скоростей течения расплава в целях обеспечения необходимого уровня температуры и ее равномерности распределения в промежуточной емкости.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, промежуточная емкость, распределение температур, титановый расплав

Abstract. The mathematical model of the titanium melt heating in electron-beam plant intermediate capacity considering its hydrodynamic flow is developed. The temperature distribution in the intermediate capacity at different melt flow rates based on this model using the finite-element analysis program ANSYS Fluent is obtained. It is established that the temperature of the molten metal in the central zone of intermediate capacity significantly exceeds the temperature in the peripheral zone, an increase in the flow velocity of the melt leads to a decrease in the temperature and an increase in the degree of temperature distribution in the intermediate capacity uniformity. The optimum melt flow speed range in order to ensure the necessary temperature and its uniformity distribution in the intermediate capacity is offered.

Keywords: electron-beam melting, intermediate capacity, temperature distribution, titanium melt

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Электронно-лучевая плавка титана* / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В.]. – К.: Наукова думка, 2006. – 248 с.
2. *Электронно-лучевая плавка* / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А., Ахонин С.В. и др.] – К.: Наукова думка, 1997. – 265 с.
3. *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве* / [С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский, Т. В. Лапшук, В. Г. Шмигидин, Л. А. Кравчук, А. С. Гладков]. – К.: Сталь, 2007. – 626 с.
4. *Минакова А.В.* О структуре производства титановой продукции: мировой опыт и реализация в Украине / Минакова А.В., Минаков В.Н., Минаков Н.В., Трефилов В.И. – К.: 1998, – 22 с. – (Препр./НАН Украины. Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича, 98-4).
5. *Патон Б.Е.*, Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокореакционных металлов / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин. – К.: Наукова думка, 2008. — 312 с.
6. *Болгарский А.В.* Термодинамика и теплопередача. Учебн. Для вузов. Изд.-е перераб. и доп. / Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
7. *Костенко В. И.* Реконструкция электронно-лучевой установки ТИСО-15М / В. И. Костенко, П.А. Пап, А. Н. Калинюк, Д.В. Ковальчук, Н.П. Кондратий, В.Б. Чернявский // Современная электрометаллургия. – 2007. – №3. - С. 24-25.
8. *Мушегян В. О.* Формирование оптимальных режимов электронно-лучевого нагрева при плавке молибдена в установке МВ-1 / В. О. Мушегян, А. А. Тарасюк // Современная электрометаллургия. – 2010. – №4. – С. 16-19.

References

1. *Paton B.E., Trigub N.P., Ahonin S.V., Zhuk G.V.*, Jelektronno-luchevaja plavka titana [Electron beam melting of titanium]. Kyiv: Naukova dumka, 2006. 248 p.
2. *Paton B.E., Trigub N.P., Kozlitin D.A., Ahonin S.V. and others*, Jelektronno-luchevaja plavka [Electron beam melting] Kyiv: Naukova dumka, 1997. 265 p.
3. *S. V. Ladohin, N. I. Levickij, V. B. Chernjavskij, T. V. Lapshuk, V. G. Shmigidin, L. A. Kravchuk, A. S. Gladkov*, Jelektronno-luchevaja plavka v litejnom proizvodstve [Electron beam melting in foundry]. Kyiv: Stal', 2007. 626 p.
4. *Minakova A.B., Minakov V.N., Minakov N.V., Trefilov V.I.*, O strukture proizvodstva titanovoj produkcii: mirovoj opyt i realizacija v Ukraine [About the structure of titanium production: world experience and implementation in Ukraine] Kyiv: 1998, 22 p. (Prepr./Frantsevich Institute for problems of materials science NAS Ukraine, 98-4).
5. *B.E. Paton, N.P. Trigub, S. V. Ahonin*, Jelektronno-luchevaja plavka tugoplavkikh i vysokoreakcionnyh metallov [Electron beam melting of refractory and high-reactive metals]. Kyiv: Naukova dumka, 2008. 312 p.
6. *Bolgarskij A.V., Muhachev G.A., Shhukin V.K.*, Termodinamika i teploperedacha. Uchebn. Dlja vuzov. Izd.-e pererab t dop. [Thermodynamics and Heat Transfer. Textbook for high schools. Redesigned and supplemented addition] Moscow: Vysshaja shkola, 1975. 495 p.
7. *Kostenko V. I., Pap P.A., Kalinjuk A. N., Koval'chuk D.V., Kondratij N.P., Chernjavskij V.B.*, Rekonstrukcija jelektronno-luchevoj ustanovki TISO-15M. Sovremennaja jelektrometallurgija., 2007. no 3. pp. 24-25.
8. *Mushegjan V. O., Tarasjuk A. A.*, Formirovanie optimal'nyh rezhimov jelektronno-luchevogo nagreva pri plavke molibdena v ustanovke MV-1. Sovremennaja jelektrometallurgija., 2010. no 4. pp. 16-19.

Подана до редакції 20.10.2014