

8. Lunc, Ya. L. (1972). Vvedeniye v teoriyu giriskopov. Moscow: Nauka, 296.  
9. Popov, Ye. I. (1973). Apparaturnye i opytno-metodicheskie raboty po morskoy gravimetrii: Sbornik statey. Moscow: Nauka, 131.

10. Tkachev, L. I. (1993). Sistemy inercialnoy orientirovki. Ch. 1. Osnovnye polozheniya teorii. Moscow: MEI, 213.  
11. Wilmoth, E. D. (1989). An investigation of methods for determining gravity anomalies from an aircraft. Mass. Inst. of Tech, 76.

Дата надходження рукопису 21.04.2015

**Безвесільна Олена Миколаївна**, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України Кафедра приладобудування, Національний технічний університету України “Київський політехнічний університет”, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: bezvesilna@mail.ru

**Коваль Антон Валерійович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: koval.anton@gmail.com

**Ткачук Андрій Геннадійович**, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: andrew\_tkachuk@i.ua

**Захарова Анна Олегівна**, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: smallartt@gmail.com

**Галицький Олександр Леонідович**, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: andru\_tkachuk@ukr.net

**Статкевич Дмитро Андрійович**, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: elan777@bigmir.net

УДК 519.651

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42632

## ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ОБ’ЄМНОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ПЛАВЛЕННЯ СПЛАВІВ

© Ю. В. Сидоренко, В. А. Третьяк

*В статті розглянуто методи апроксимації функції залежності коефіцієнта об’ємної теплоємності від температури при моделюванні нагріву та плавлення сплавів. Використання наближених формул обумовлене складністю визначення коефіцієнта об’ємної теплоємності сплавів. Наведено результати розрахунків та приклади графіків, що отримані в результаті застосування різних формул апроксимації. Для забезпечення гнучкості пропонується використання апроксимації методом Гауса*

**Ключові слова:** моделювання процесу плавлення-кристалізації, коефіцієнт об’ємної теплоємності, апроксимація

*The article considers volumetric heat capacity approximation methods for heating at simulation of melting of alloys. Due to complexity of volume-specific heat capacity determination approximation should be used. The calculation data and graphic examples of different approximation methods are given. For more flexibility it is proposed to use Gauss method for approximation*

**Keywords:** simulation of melting-crystallization process, volumetric heat capacity, approximation

### 1. Вступ

Процес плавлення є окремим випадком фазового переходу. Існує два загальних підходи до розв’язування задачі про фазовий перехід: з явним і неявним урахуванням межі розділу фаз (фронту). Перший підхід в англійській літературі називається задачею про фазовий перехід в постановці Стефана.

Другий підхід називають схемою наскрізного розрахунку, а в англійських статтях – задачею про фазовий перехід в ентальпійному формулюванні, оскільки рівняння ентальпії може бути зведене до нелінійного рівняння теплопровідності за рахунок визначення функції коефіцієнта об’ємної теплоємності з рівняння Кірхгофа [1]. Для цього необхідно виконати згладжу-

вання коефіцієнта об'ємної теплоємності, що приводить до схем наскрізного розрахунку [2].

Класична постановка задачі Стефана не може бути застосована для моделювання плавлення сплавів [3]. Методи з явним виділенням фронтів не підходять для задач з наперед невідомою кількістю фронтів, крім того їх складно розширювати на тривимірні задачі. Натомість схеми наскрізного розрахунку дозволяють урахувати фазові переходи за умови використання специфічних методів побудови просторово-часової різничевої сітки [4].

Математичні постановки задачі про фазові переходи відрізняються в залежності від обраного підходу моделювання. В загальному, постановка задачі включає основне рівняння, що описує теплопередачу в середині об'єкта й справджується для кожного з агрегатних станів (фаз), початкові та граничні умови (опціонально, умови Стефана). Основне рівняння для твердих тіл описує теплопровідність в середині зразка. В більш точних моделях воно визначається як нелінійне нестационарне диференціальне рівняння в частинних похідних (ДРЧП) [4–6]. Однак часто для спрощення теплофізичні параметри матеріалів вважають сталими. У зв'язку зі збільшенням розрахункових потужностей техніки та з метою підвищення точності результатів моделювання цього спрощення можна уникнути. В статті розглядаються методи більш точної апроксимації функції залежності об'ємної теплоємності від температури.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

За даними довідників [7] коефіцієнт теплоємності в інтервалі плавлення-кристалізації залежить від температури, як показано на графіках (рис. 1). У більшості технологічних процесів температура завжди більша або дорівнює температурі оточуючого середовища, тому області низьких температур (0 К), в яких теплоємність різко зростає від значення нуля не досліджуються. Область дослідження виділена прямокутником. Близько температури фазового перетворення залежність коефіцієнта теплоємності має особливість. Це призводить до необхідності довизначення даної функції близько особливої точки. Отже залежність коефіцієнта об'ємної теплоємності (КОТ) потрібно апроксимувати іншою функцією від температури, яка в інтервалі фазового переходу буде мати різкий сплеск.

Цікавою особливістю залежності КОТ від температури є те, що на неї впливає швидкість нагріву та охолодження, оскільки при різних швидкостях зміни температури при переході між фазами в сталі утворюються різні структури: ферит, перліт, мартенсит та бейніт. При чому масові частки цих фаз також залежать від швидкості нагріву та охолодження та не можуть бути точно визначеними [8]. Для твердого та рідкого агрегатного стану залежність КОТ від температури близька до лінійного закону [9]. В інтервалі плавлення-кристалізації має місце різке зростання теплоємності (сплеск), який породжує істотну нелінійність рівняння теплопровідності. Саме цим сплеском нехтує більшість авторів, вважаючи КОТ сталою

або лінійною функцією. У випадку використання композитних матеріалів, залежність КОТ додатково ускладнюється: кожна складова композиту додає особливу точку до функції КОТ.

Через складність функції КОТ при зміні фаз, а також для забезпечення можливості моделювання плавлення композитних матеріалів виникає необхідність пошуку ефективного методу апроксимації КОТ. Апроксимуюча функція повинна надавати можливість моделювати складну поведінку КОТ в інтервалі плавлення-кристалізації, враховувати сплески залежності КОТ, не додаючи осциляцій, а також бути неперервно-диференційованою, для забезпечення числового розв'язування нелінійної крайової задачі.

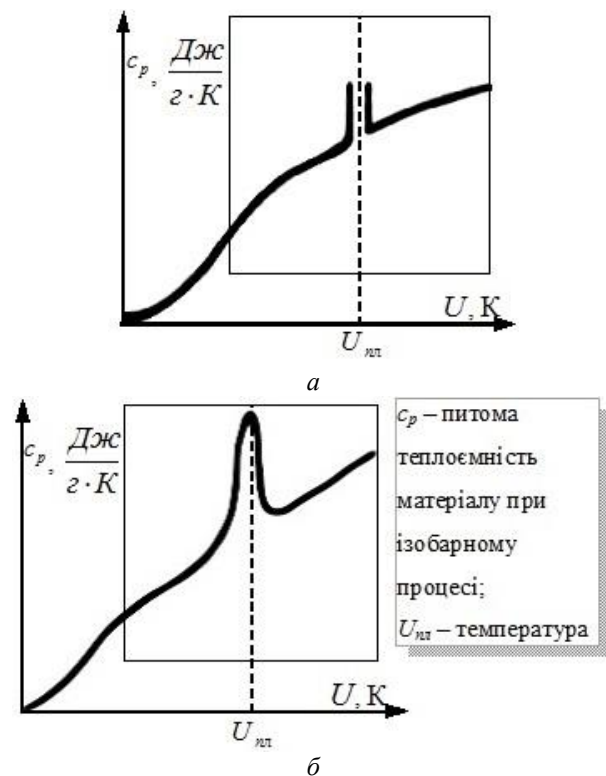


Рис. 1. Графіки залежності коефіцієнта теплоємності при перетвореннях: а – I роду; б – II роду

## 3. Методи апроксимації залежності коефіцієнта об'ємної теплоємності від температури

### Квадратична апроксимація

В [6] для апроксимації функції коефіцієнта об'ємної теплоємності заліза було отримано поліном другого ступеня від температури:

$$C(U) = 2,6137 \cdot 10^{-4} \cdot U^2 + 0,12034621 \cdot U + 124,$$

який не враховує сплеск при фазовому переході. В інтервалі температур, що розглядається, запропонована апроксимація близька до лінійної, тому цей метод можна розглядати як альтернативу лінійній апроксимації.

### Використання функції Хевісайда або кусково-постійна апроксимація

Для відображення сплеску коефіцієнта теплоємності деякі автори апроксимують його кусково-постійною функцією, інші пропонують враховувати

фазовий перехід за допомогою функції Хевісайда, що по суті приводить до однакових графіків [5].

Кусково-лінійна апроксимація коефіцієнта об'ємної теплоємності

В багатьох дослідженнях [10] пропонується враховувати поступове збільшення коефіцієнта об'ємної теплоємності відносно температури поза межами інтервалу плавлення-кристалізації, що краще відповідає фізиці процесу. Для цього використовується кусково-лінійна апроксимація КОТ (рис. 2). Для виконання такої апроксимації необхідно знати наступні дані, які можна знайти в довідниках або визначити експериментально:

1.  $C(20)$  – значення коефіцієнта при звичайній температурі 20 °С;
2.  $[U_s, U_L]$  – інтервал плавлення/кристалізації;
3.  $L$  – приховану теплоту плавлення;
4.  $(U_k; C(U_k))$  – значення КОТ при деякій температурі  $U_k \neq 20$  °С, що використовується для визначення кутових коефіцієнтів та вільних членів апроксимуючої функції.

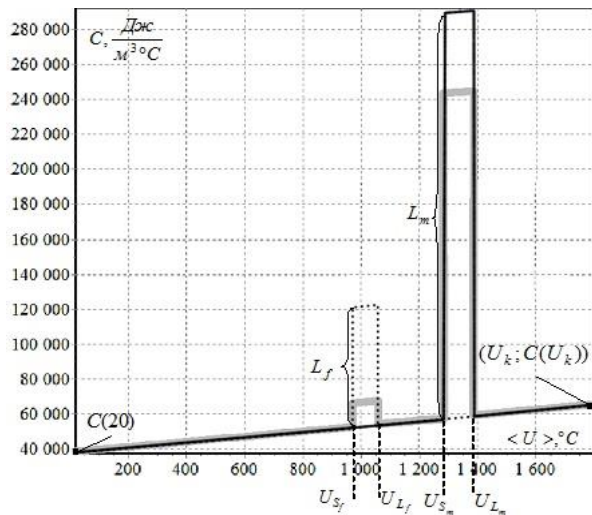


Рис. 2. Кусково-лінійна залежність ефективної теплоємності матеріалу покриття від середньої температури

Лінійно-експоненціальна апроксимація

В [4] було запропоновано ідею апроксимувати сплеск функції коефіцієнта об'ємної теплоємності за допомогою функції щільності нормального закону розподілу, причому враховувалось лінійне зростання коефіцієнта поза межами інтервалу плавлення-кристалізації:

$$C(U) = Le^{-\beta(U-U_{nl})^2} + kU + Z, \quad (1)$$

де  $L$  – відповідає прихованій теплоті плавлення матеріалу;  $\beta$  – визначає ширину інтервалу плавлення-кристалізації;  $U_{nl}$  – температура плавлення, для сплавів вважається медіаною  $[U_s, U_L]$ ;  $k$  – кутовий коефіцієнт лінійної складової функції;  $Z$  – значення об'ємної теплоємності при температурі 0 °С.

Графік залежності КОТ прийме наступний вигляд (рис. 3). Для побудови такої апроксимаційної функції використовуються ті самі параметри, що і для кусково-лінійної апроксимації.

Всі коефіцієнти функції (1) розраховуються тривіально, виходячи з заданих параметрів, окрім  $\beta$ . Коефіцієнт  $\beta$  відповідає за ширину інтервалу  $[U_s, U_L]$ , його можна обчислювати, в залежності від того, на скільки збільшується КОТ при досягненні температури кристалізації  $U=U_s$ . Так регулюється стрімкість зростання КОТ. На графіку (рис. 3) зображено залежності описаного раніше композиту, обчислені відповідно до припущення, що при  $U=U_s$  КОТ досягає половини від свого максимуму.

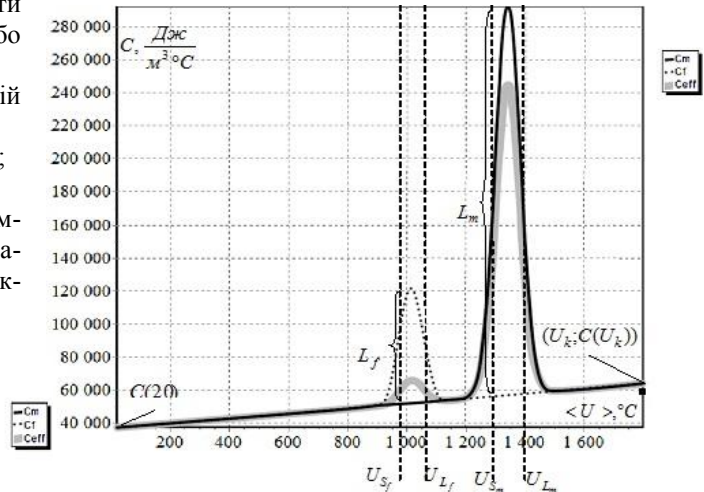


Рис. 3. Лінійно-експоненціальна залежність ефективної теплоємності матеріалу покриття від середньої температури

Інтерполяція методом Гауса

Недоліком розглянутих методів є відсутність універсальності. Очевидно, найточнішим є лінійно-експоненціальний метод. Для підвищення точності необхідно обрати універсальний метод, який буде проводити апроксимацію по точках, визначених експериментально. Такий метод дозволить врахувати складний характер функції КОТ.

Враховуючи вимоги щодо відсутності осциляцій та можливості неперервного диференціювання, для апроксимації КОТ було обрано інтерполяційну функцію Гауса [11]:

$$G(x) = \tilde{y}_1 e^{-\alpha(x-x_1)^2} + \tilde{y}_2 e^{-\alpha(x-x_2)^2} + \dots + \tilde{y}_n e^{-\alpha(x-x_n)^2}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – деякий коефіцієнт, значенням якого можна варіювати.

Базисні значення  $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n$  знаходять один раз перед виконанням моделювання, як розв'язок системи рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} \tilde{y}_1 e^{-\alpha(x-x_1)^2} + \tilde{y}_2 e^{-\alpha(x-x_2)^2} + \dots + \tilde{y}_n e^{-\alpha(x-x_n)^2} = y_1, \\ \tilde{y}_1 e^{-\alpha(x-x_1)^2} + \tilde{y}_2 e^{-\alpha(x-x_2)^2} + \dots + \tilde{y}_n e^{-\alpha(x-x_n)^2} = y_2, \\ \dots \\ \tilde{y}_1 e^{-\alpha(x-x_1)^2} + \tilde{y}_2 e^{-\alpha(x-x_2)^2} + \dots + \tilde{y}_n e^{-\alpha(x-x_n)^2} = y_n. \end{cases}$$

Запропонований спосіб інтерполяції відрізняється передусім тим, що вплив будь-якого відхилення в експоненціальній залежності зменшується зі збільшенням відстані до шуканої точки, що зумовлює

краще наближення у порівнянні, наприклад, з методом Лагранжа.

Окрім цього, інтерполяційна функція Гауса є  $n$ -разів диференційованою і стійкою до малих відхилень початкових даних.

На рис. 4 представлено результати розрахунку функції коефіцієнта об'ємної теплоємності за допомогою інтерполяційної функції Гауса.

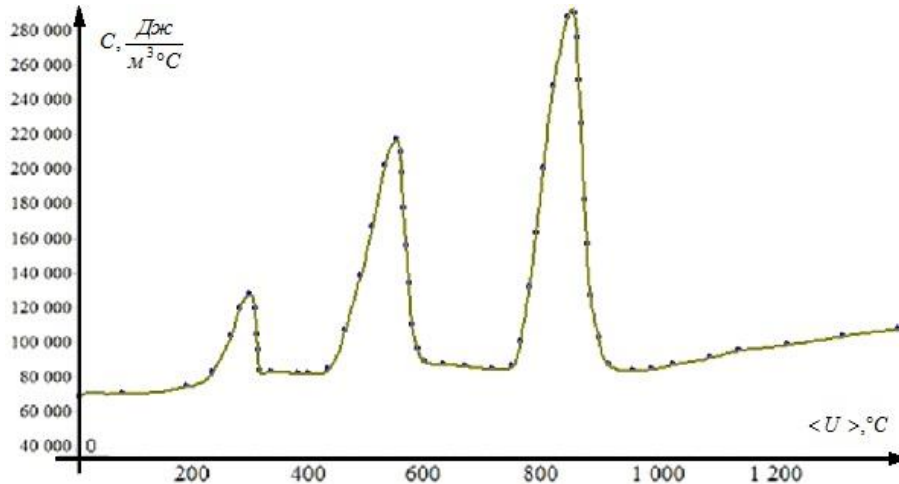


Рис. 4. Інтерполяція Гаус-функцією залежності ефективного коефіцієнта теплоємності матеріалу покриття від середньої температури

### 5. Результати досліджень

Для проведення досліджень розглянуті способи апроксимації функції КОТ було застосовано при моделюванні лазерно-дугового наплавлення композитного порошку, що складається зі сталі 9Х18 та бронзи (20 %) ОЦС 3-8-6. Результати моделювання показали, що способи, які не враховують сплески КОТ при фазовому переході, в середньому збільшують похибку на 10 %, що є значним відхиленням. Хоча для них необхідна менша кількість обчислень: лінійний спосіб – 6 операцій на кожний вузол різницевої сітки, квадратичний – 13 операцій. Способи, що враховують сплески КОТ при фазових переходах, потребують специфічних методів обчислення, які уповільнюють розрахунки приблизно на 30 % [10], зменшуючи похибку на 7 %. Для двокомпонентного композиту кількість операцій для визначення КОТ на один вузол при використанні кусково-лінійного способу складає 19, лінійно-експоненціального – 62. Інтерполяція функцією Гауса вимагає  $O(n)$  операцій, параметричний спосіб –  $O(n^3)$ , за умови розв'язання системи лінійних рівнянь методом Гауса. За умови конфігурації функції Гауса відповідно до рис. 3 результати моделювання практично збігаються з лінійно-експоненціальним методом. Використання цих методів дозволяє скоротити загальну кількість ітерацій в середньому на 15 % за рахунок неперервності апроксимаційних функцій. Хоча спосіб інтерполяції функцією Гауса дещо збільшує машинні витрати на моделювання, його важливою перевагою є гнучкість, інші способи потребують перепрограмування для апроксимації КОТ з довільною кількістю складових композиту. Крім того, функція Гауса дозволяє врахувати додаткові перетворення, наприклад, мартенситні. Тому для проведення остаточної симуляції перед запуском технологічного процесу наплавлення рекомендується використовувати саме функцію Гауса.

### 6. Висновки

Коефіцієнт теплоємності в інтервалі фазового переходу (плавлення-кристалізації) залежить від температури. Близько температури фазового перетворення (в інтервалі фазового переходу) залежність коефіцієнта теплоємності має особливість. Це призводить до необхідності довізнання даної функції. Таким чином, залежність коефіцієнта об'ємної теплоємності потрібно апроксимувати іншою функцією від температури, яка в інтервалі фазового переходу буде мати різкий сплеск.

У роботі проведено аналіз способів апроксимації залежності коефіцієнта об'ємної теплоємності від температури, а саме: за допомогою використання функції Хевісайда або кусково-постійної апроксимації, квадратичної апроксимації, лінійно-експоненційної апроксимації та інтерполяції за допомогою Гаус-функції. Використання параметричної Гаус-функції потребує більшої кількості обчислень але надає більше гнучкості за рахунок універсальності, оскільки інтерполяція проводиться по заданим користувачем значенням, що можуть бути визначені експериментально. Принадою даного способу є також неперервність  $n$ -ої похідної інтерполяційної функції Гауса.

### Література

1. Verhoeven, J. C. J. Modelling laser induced melting [Text] / J. C. J. Verhoeven, J. K. M. Jansen, R. M. M. Mattheij, W. R. Smith // Mathematical and Computer Modelling. – 2003. – Vol. 37, Issue 3–4. – P. 419–437. doi: 10.1016/s0895-7177(03)00017-7
2. Соловьева, Е. Н. Схемы сквозного счета численного решения краевых задач с неизвестными границами для одномерных уравнений параболического типа [Текст] / Е. Н. Соловьева, А. Б. Успенский // Методы решения краевых и обратных задач теплопроводности. – 1975. – № 5. – С. 3–23.
3. Бреславский, П. В. Алгоритм численного решения гидродинамического варианта задачи Стефана при помощи динамически адаптирующихся сеток [Текст] / П. В. Бреславский, В. И. Мажукин // Математическое моделирование. – 1991. – Т. 3, № 10. – С. 104–115.
4. Лукьяненко, С. А. Проблема учета зависимости коэффициента объемной теплоемкости от температуры при моделировании лазерно-дуговой наплавки [Текст] / С. А. Лукьяненко, В. А. Третьяк // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 1 (89). – С. 177–182.
5. Перелома, В. А. Исследование тепловых процессов и структуры поверхностного слоя при лазерной наплавке порошковых материалов [Текст] / В. А. Перелома, А. А. Щерба, А. Д. Подольцев и др. – К : Институт электродинамики НАН Украины, 1998. – 47 с.
6. Amara, E. H. Numerical modelling of the laser cladding process using a dynamic mesh approach [Text] / E. H. Amara, F. Hamadi, L. Achab, O. Boumia // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 15, Issue 1–2. – P. 100–106. doi: 10.1109/caol.2005.1553842

7. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов [Текст] / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – М.: «Металлургия», 1980. – 320 с.

8. Князева, А. Г. Проблемы моделирования технологических процессов поверхностной обработки материалов и нанесения покрытий с использованием высокоэнергетических источников [Текст] / А. Г. Князева, О. Н. Крюкова, Н. В. Букина, С. Н. Сорокова // Известия ТПУ. – 2010. – № 2. – С. 93–101.

9. Иванов, Д. А. Расчет теплоемкости низкоуглеродистой низколегированной стали при моделировании неізотермических фазовых превращений [Текст] / Д. А. Иванов, Н. В. Куваев, Т. В. Куваева // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1–2. – С. 43–48.

10. Комп'ютерне моделювання у лазерних технологіях [Текст] / Л. Ф. Головкин, С. О. Лук'яненко, І. Ю. Михайлова, В. А. Третьяк. – К.: ВПП "Текст", 2015. – 236 с.

11. Бадаєв, Ю. І. Реалізація інтерполяційного методу Гаусс-функції та порівняльний аналіз [Текст] / Ю. І. Бадаєв, Ю. В. Сидоренко. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 1998. – Вип. 63. – С.33–37.

#### References

1. Verhoeven, J. C. J., Jansen, J. K. M., Mattheij, R. M. M., Smith, W. R. (2003). Modelling laser induced melting. *Mathematical and Computer Modelling*, 37 (3-4), 419–437. doi: 10.1016/s0895-7177(03)00017-7

2. Solov'eva, E. N., Uspenskiy, A. B. (1975). Skhemy skvoznogo scheta chislenogo resheniya kraevykh zadach s neizvestnymi granitsami dlya odnomernykh uravnenij parabolicheskogo tipa [Schemes of through computation of the numerical solution of boundary value problems with unknown boundaries for one-dimensional parabolic equations]. *Methods of solving boundary and inverse heat conduction problems*, 5, 3–23.

3. Breslavskiy, P. V., Mazhukin, V. I. (1991). Algoritm chislenogo resheniya gidrodinamicheskogo varianta zadachi Stefana pri pomoshchi dinamicheski adaptiruyushchih setok [The algorithm of a hydrodynamical version of Stefan problem numerical solution by dynamic adapting grid]. *Mathematical modeling*, 3 (10), 104–115.

4. Luk'yanenko, S. A., Tretyak, V. A. (2014). Problema ucheta zavisimosti koeffitsienta ob'emnoy teploemkosti ot tem-

perature pri modelirovanii lazerno-dugovoy naplavki [Temperature dependence consideration issue for coefficient of volumetric heat capacity in simulation of laser-arc pad weld process]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 1 (89), 177–182.

5. Pereloma, V. A., Shcherba, A. A., Podol'tsev, A. D. et al. (1998). Issledovanie teplovykh protsessov i struktury poverhnostnogo sloya pri lazernoy naplavke poroshkovykh materialov [Heat process and the cover structure while laser cladding of powder materials research]. *The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 47.

6. Amara, E. H., Hamadi, F., Achab, L., Boumia, O. (2006). Numerical modelling of the laser cladding process using a dynamic mesh approach. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 15 (1-2), 100–106. doi: 10.1109/caol.2005.1553842

7. Livshits, B. G., Kraposhin, V. S., Linetskiy, Ya. L. (1980). Fizicheskie svoystva metallov i splavov [Physical properties of metals and alloys]. *Metallurgy*, 320.

8. Knyazeva, A. G., Kryukova, O. N., Burkina, N. V., Sorokova, S. N. (2010). Problemy modelirovaniya tehnologicheskikh protsessov poverkhnostnoy obrabotki materialov i naneseniya pokrytiy s ispol'zovaniem vysokoenergeticheskikh istochnikov [Simulation issues of surface treatment and coating materials using high energy sources]. *Izvestiya of TPU*, 317 (2), 93–101.

9. Ivanov, D. A., Kuvaev, N. V., Kuvaeva, T. V. (2010). Raschet teploemkosti nizkouglерodistoy nizkolegированной стали pri modelirovanii neізotерmicheskikh fazovykh prevrashcheniy [The heat capacity of low-carbon low-alloy steel calculation for modeling of non-isothermal phase transitions]. *Theory and practice of metallurgy*, 1–2, 43–48.

10. Holovko, L. F., Lukianenko, S. O., Mikhailova, I. Yu., Tretyak, V. A. (2015). Kompyuterne modeliuвання u lazernykh tekhnolohiiakh [Computer simulation in laser technologies]. *Text*, 236.

11. Badaiev, Yu. I., Sydorenko, Yu. V. (1998). Realizatsiia interpolatsiynoho metodu Gaus-funktsii ta porivnialnyy analiz [Interpolation method by Gauss function implementation and comparative analysis]. *Applied geometry and engineering graphics*, 63, 33–37.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Аушева Н. М.*

*Дата надходження рукопису 23.04.2015*

**Сидоренко Юлія Всеволодівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: suliko3@ukr.net

**Третьяк Валерія Анатоліївна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: valery.tretyak@gmail.com

УДК 665.9

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42641

## ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА СВЯЗНОСТИ В АЛГОРИТМЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

© Т. Б. Шатовская, И. В. Каменева

*В статье рассмотрены результаты работы модификации алгоритма Хамелеон. Иерархический многоуровневый алгоритм состоит из нескольких фаз: построение графу, огрубление, разделение и восстановление. На каждой фазе могут быть использованы различные подходы и алгоритмы. Главной целью работы является исследование качества кластеризации различных наборов данных с помощью набора комбинаций алгоритмов на разных этапах работы алгоритма и улучшения этапа построения через оптимизации алгоритма выбора k при построении графа k ближайших соседей*

**Ключевые слова:** кластеризация, алгоритм Хамелеон, построение графа, связность, k-ближайших соседей, иерархическая кластеризация