

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА
ТА ЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА



XVI Міжнародна науково-технічна
конференція

**«Нові матеріали і технології
в машинобудуванні-2024»**

***Металургія в КПІ:
80 років досягнень,
викликів та інновацій***

Україна, Київ

2024

УДК 621.74-027.31(082)

ББК 34.61я43

Н73

У збірнику представлено матеріали, які висвітлюють актуальні проблеми ливарного виробництва: розроблення прогресивних ресурсозаощадних технологій, одержання литих виробів із різних металів і сплавів у разових ливарних формах і спеціальними способами лиття, фізико-хімічні основи технології металів і сплавів, теорія кристалізації і твердіння виливків, розроблення і використання перспективних формувальних матеріалів і сумішей, сучасні технології виготовлення ливарних форм і стрижнів, моделювання технологічних процесів ливарного виробництва.

XVI Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024: матеріали науково-технічної конференції, 25...26 квітня 2024 р., Київ / загальна редакція Р. В. Лютий. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 409 с.

Відповідальність за інформацію у наданих матеріалах несуть автори.

Технічний редактор: М. М. Ямшинський

Комп'ютерна верстка: І. В. Лук'яненко

УДК 621.74-027.31(082)

ББК 34.61я43

ISSN 2524-0544

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, 2024

Селівьорстов В.Ю., Доценко Ю.В., Адамчук М.С. (УДУНТ, м. Дніпро) ВИБІР ГАЗОУТВОРЮЮЧОЇ РЕЧОВИНИ ДЛЯ НАДЛИВУ З ПОНАДАМОСФЕРНИМ ТИСКОМ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ РІЗНОЇ ТРИВАЛОСТІ ЗАТВЕРДІННЯ.....	306
Соколан Ю.С., Соколан К.С. (Хмельницький національний університет, м. Хмельницький) ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ТАГУЧІ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ	310
Солоненко Л.І.¹, Білий О.П.², Мазорчук В.Ф.², Усенко Р.В.², Замятін М.І.¹, Чумаченко В.Б.¹ (¹НУ «Одеська політехніка», м. Одеса; ²УДУНТ, м. Дніпро) ВПЛИВ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ НА ТОЧНІСТЬ РОЗМІРІВ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АК5М2.....	315
Солоненко Л.І.¹, Якименко Д.Ю.², Білий О.П.², Мазорчук В.Ф.², Реп'ях С.І.², Погребський О.І.¹ (¹НУ «Одеська політехніка», м. Одеса; ²УДУНТ, м. Дніпро) ОБСИПАЛЬНІСТЬ ЗАМОРОЖЕНОЇ ПІЩАНО-ВОДЯНОЇ СУМІШІ НА ПОВІТРІ З КІМНАТНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ.....	317
Степанчук А.М., Тесля С.Ю., Судakov Д.С., Чижевська Д.В. (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ) КОМПАКТУВАННЯ ПОРОШКОВИХ СПЛАВІВ 75 % Al + 15 % Fe	319
Титаренко В.В.¹, Заблудовський В.О.² (¹НТУ «Дніпровська політехніка»; ²УДУНТ, м. Дніпро) ЗНОСОСТІЙКІ КОМПОЗИЦІЙНІ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ.....	326
Токова О.В.¹, Дорошенко В.С.² (¹Міжнародний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України; ²ФТІМС НАН України, Київ) МОДЕЛЮВАННЯ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В КОНВЕРТЕРНІЙ ПЕЧІ МООВОЮ ПРОГРАМУВАННЯ PYTHON У ФРЕЙМВОРКУ STREAMLIT.....	329
Турчанін М.А., Агравал П.Г., Водоп'янова Г.О., Корсун В.А. (ДДМА, м. Краматорськ) ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ, ЦИРКОНІЮ І ГАФНІЮ.....	332
Устименко А. І., Лук'яненко І. В. (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ) ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ДЛЯ УТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНОЇ СТРУКТУРИ ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ ФОРМОКОМПЛЕКТУ СКЛОТАРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	336
Федоров М.М., Дьяченко Ю.Г. (ДДМА, м. Краматорськ–Тернопіль) АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБНИЧИХ ПІЩАНО- БЕНТОНІТОВИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПО-СИРОМУ	340
Фесенко А.М.¹, Фесенко М.А.² (¹ДДМА, м. Краматорськ; ²ДНДІ МВС України, Київ) ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУННИХ ВИЛИВКІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ КРАЇНИ	342
Фон Прусс М.А. (ФТІМС НАН України, Київ) СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МОДИФІКОВАНИХ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ.....	344
Хворостяний В.В. (ІПМ ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ) ОЦІНКА МЕХАНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З БАГАТОШАРОВОГО СКЛА З УДАРНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ МЕТОДОМ СТАТИЧНОГО ПРОДАВЛЮВАННЯ ПУАНСОНОМ	348
Цибаньов Г.В. (ІПМ ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ) МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОСТУ ТРІЩИНИ ВТОМИ НА ГЛАДКІЙ ПОВЕРХНІ	353
Чорноіваненко К.О., Мовчан О.В. (УДУНТ, м. Дніпро) ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ НАВУГЛЕЦЬОВАНОГО Fe-Cr-Ti СПЛАВУ.....	357
Школяренко В.П., Дереча Д.О. (ФТІМС НАН України, Київ) МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ «МІДЬ-ЗАЛІЗО»	361

Турчанін М.А., Агравал П.Г., Водоп'янова Г.О., Корсун В.А.
(ДДМА, м. Краматорськ)
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ,
ЦИРКОНІЮ І ГАФНІЮ
E-mail: pagraval68@gmail.com

Фізико-хімічні особливості взаємодії титану, цирконію і гафнію є важливими для розробки високотемпературних конструкційних матеріалів, таких як тугоплавкі високоентропійні сплави, високотемпературні композити на основі високоентропійних карбідних фаз, жароміцні ливарні сплави та інші. Разом з тим, експериментальне дослідження властивостей розплавів системи Ti–Zr–Hf є утрудненим через високі температури плавлення компонентів. В даній роботі термодинамічні властивості рідких сплавів були змодельовані в рамках CALPHAD-методу.

У CALPHAD-методі експериментальна інформація про термодинамічні властивості фаз системи і границі фазових перетворень за їхньою участю конвертується в параметри моделей енергії Гіббса відповідних фаз, які дозволяють розрахувати термодинамічні властивості фаз і діаграму стану системи. У разі необхідності, результати, одержані для систем з меншим числом компонентів, можуть бути екстрапольовані на багатокомпонентні системи. В даній роботі для моделювання термодинамічних властивостей трикомпонентних рідких сплавів Ti–Zr–Hf були використані результати термодинамічних описів двокомпонентних систем Ti–Zr [1], Ti–Hf [2] і Zr–Hf [3]. Розраховані відповідно до [1-3] діаграми стану систем, інтегральні ентальпії змішування $\Delta_m H$ і термодинамічні активності компонентів a_{Me} показані на рис. 1.

Діаграми стану систем демонструють утворення необмежених рядів твердих розчинів з ОЦК ґраткою – (β)-фази – між високотемпературними модифікаціями металів і утворення безперервних твердих розчинів з ГПУ ґраткою – (α)-фази – між низькотемпературними модифікаціями металів.

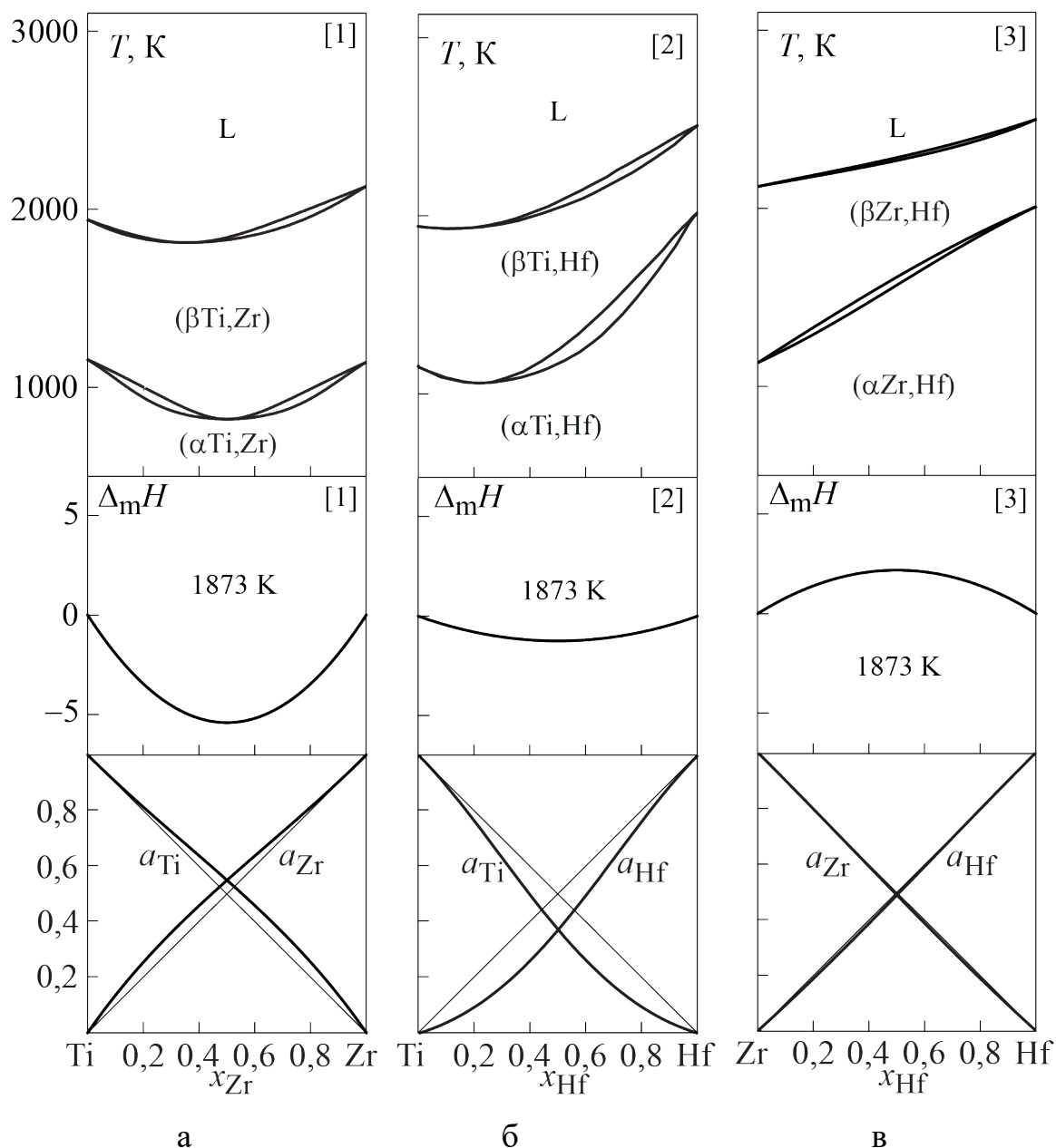


Рис. 1. Діаграми стану, ентальпії змішування $\Delta_m H$ (кДж/моль) і термодинамічні активності компонентів a_{Me} систем Ti–Zr(а), Ti–Hf (б) і Zr–Hf (в)

Компоненти рідких сплавів демонструють слабку взаємодію. Інтегральна ентальпія змішування характеризується невеликими величинами, і досягає при еквіатомному складі мінімальних значень $-5,4$ кДж/моль в системі Ti–Zr і $-1,2$ кДж/моль в системі Ti–Hf, та максимального значення $2,2$ кДж/моль в системі Zr–Hf. Ізотерми термодинамічних активностей компонентів демонструють незначні відхилення від ідеальності, від’ємні для рідких сплавів Ti–Zr і додатні для рідких сплавів Ti–Hf. Лінії ізотерм термодинамічних активностей компонентів

розплавів Zr–Hf майже не відрізняються від прямих, побудованих у відповідності до закону Рауля.

Використовуючи параметри моделей, представлені в термодинамічних описах [1–3], для інтегральної мольної енергії Гіббса змішування $\Delta_m G$ рідких сплавів системи Ti–Zr–Hf був записаний вираз:

$$\Delta_m G = R \cdot T (x_{Ti} \ln x_{Ti} + x_{Zr} \ln x_{Zr} + x_{Hf} \ln x_{Hf}) + x_{Ti} x_{Zr} (-21700 + 14,7 \cdot T) + x_{Ti} x_{Hf} (-4994 - 7,1 \cdot T) + x_{Zr} x_{Hf} (8750 - 4,9 \cdot T), \text{ Дж/моль,}$$

в якому перший доданок описує ідеальну складову енергії Гіббса змішування трикомпонентного розплаву $\Delta_m G^{id}$, а інші доданки відповідають внескам двокомпонентних систем в надлишкову енергію Гіббса змішування $\Delta_m G^{ex}$. Розраховані відповідно до даної моделі термодинамічні функції змішування трикомпонентних рідких сплавів системи Ti–Zr–Hf при 1900 К показані на рис. 2. Розташування екстремумів функцій позначено на концентраційному трикутнику крапками. Як видно з даного рисунку, надлишкові термодинамічні функції змішування цієї трикомпонентної системи є знакозмінними, що є наслідком суперпозиції незначних за абсолютними значеннями, але протилежних за знаком відповідних функцій у граничних двокомпонентних системах. Інтегральна ентальпія змішування $\Delta_m H$ демонструє переважно від’ємні значення (рис. 2, а). Від’ємні значення надлишкові ентропії змішування $\Delta_m S^{ex}$ також охоплюють значну частину концентраційного трикутника (рис. 2, б). Переважно від’ємні значення є властивими і для надлишкової енергії Гіббса змішування $\Delta_m G^{ex}$ при 1900 К (рис. 2, в). Концентраційний хід ізоліній надлишкових термодинамічних функцій змішування розплавів системи Ti–Zr–Hf визначається характерними для них слабкими парними взаємодіями.

Як видно з рис. 2, г, мінімальне значення інтегральної енергії Гіббса змішування трикомпонентних рідких сплавів розташовано поблизу еквіатомного складу і становить $-19,0$ кДж/моль при $Ti_{0,38}Zr_{0,22}Hf_{0,40}$. Це дозволяє зробити висновок про визначальний внесок ідеальної складової $\Delta_m G^{id}$ у значення і

топологію функції $\Delta_m G$. Температурна залежність функції $\Delta_m G$ в системах з таким типом взаємодії компонентів у більшій мірі пов'язана зі зміною її ідеальної складової. Тобто, при зниженні температури термодинамічна стабільність рідких сплавів зменшується пропорційно $\Delta_m G^{id}$. Розрахунки показують, що таке зменшення не призводить до незмішуваності рівноважної або рідкої фази навіть при значному переохолодженні.

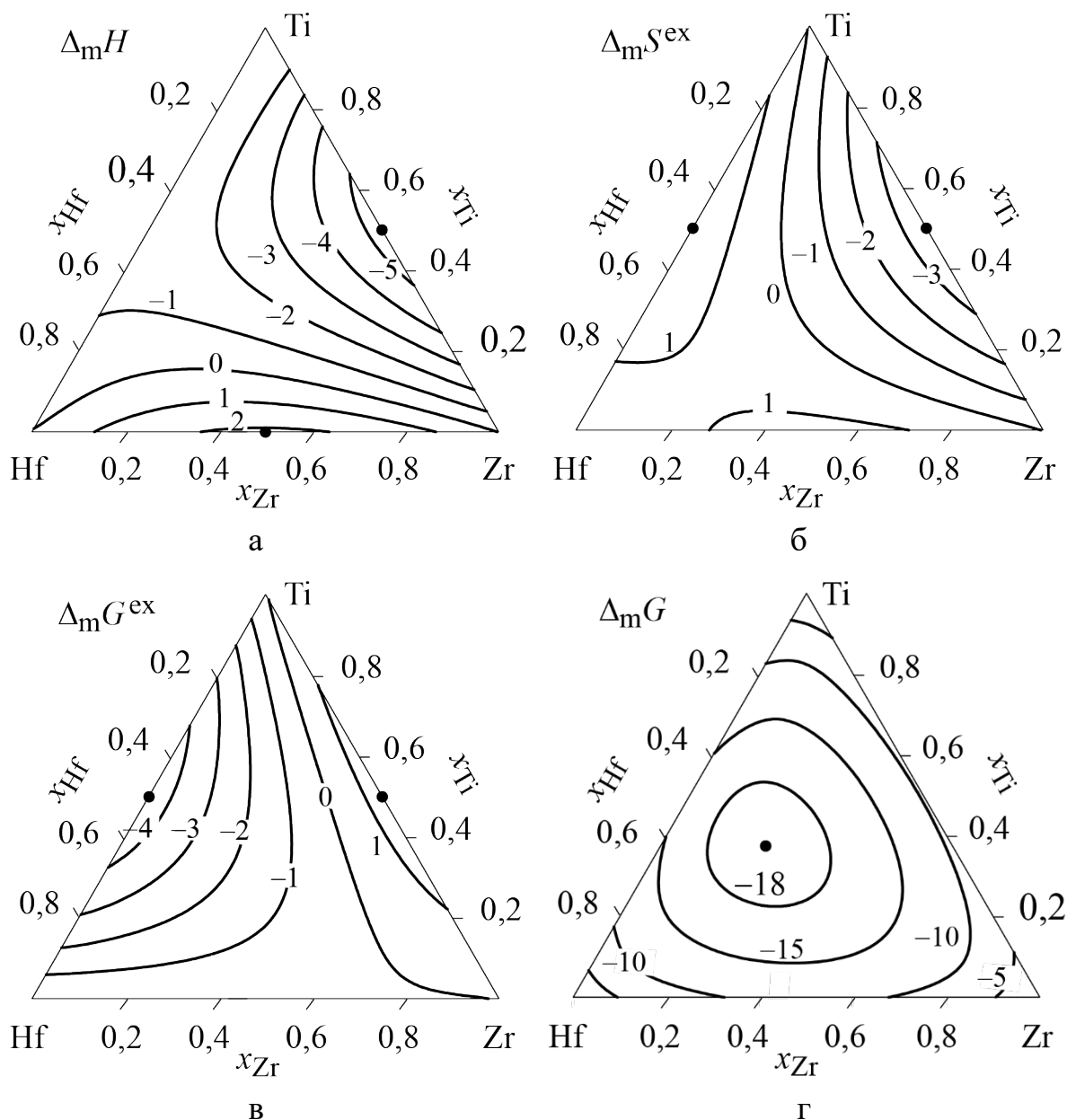


Рис. 2. Термодинамічні функції змішування рідких сплавів Ti–Zr–Hf при 1900 К: а – $\Delta_m H$, кДж/моль; б – $\Delta_m S^{ex}$, Дж/(моль·К); в – $\Delta_m G^{ex}$, кДж/моль; г – $\Delta_m G$, кДж/моль

Таким чином, моделювання термодинамічних властивостей рідких сплавів системи Ti–Zr–Hf продемонструвало слабку взаємодію їхніх компонентів. Для сплавів центральної частини концентраційного трикутника переважно від’ємний внесок надлишкової складової енергії Гіббса змішування $\Delta_m G^{ex}$ у загальне значення функції $\Delta_m G$ не перевищує 10 %. Основним фактором, який обумовлює термодинамічну стабільність рідкої фази системи, є внесок ідеальної складової $\Delta_m G^{id}$, який і визначає основні риси температурно-концентраційної залежності енергії Гіббса змішування. Зроблені висновки є важливими для подальшого моделювання фазових рівноваг в системі Ti–Zr–Hf і розрахунку її діаграми стану.

Література:

1. Turchanin, M. A. Thermodynamic Assessment of the Cu-Ti-Zr System. II. Cu-Zr and Ti-Zr Systems / M. Turchanin, P. Agraval, A. Abdulov // Powder Metall. Met. Ceram. – 2008. – Vol. 47, No.7-8. – P. 428-446.
2. Bittermann, H. Critical assessment and thermodynamic calculation of the ternary system boron-hafnium-titanium (B-Hf-Ti) / H. Bittermann, P. Rogl // J. Phase Equilib. – 1997. – Vol. 18, No.1. – P. 24-47.
3. Bittermann, H. Critical assessment and thermodynamic calculation of the ternary system C-Hf-Zr (Carbon-Zirconium-Hafnium) / H. Bittermann, P. Rogl // J. Phase Equilib. – 2002. – Vol. 23, No. 3. – P. 218-235.

Устименко А. І., Лук’яненко І. В.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ДЛЯ УТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНОЇ СТРУКТУРИ ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ ФОРМОКОМПЛЕКТУ СКЛОТАРНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

E-mail: ustymenko@kpi.ua

Дослідження ринку матеріалів формокомплекту склотарної промисловості виокремлює такі найуживаніші матеріали як бронзи, нержавіючі сталі, нікелеві сплави і навіть композити, але найбільшої популярності набули ливарні чавуни, оскільки вироби з них є економічними, доступнішими та простішими у