

**Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія  
Асоціація ливарників України  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України  
Донецька державна обласна адміністрація  
ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»  
ПАТ «Енергомашспецсталь»**

# **ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛИ Й ОБЛАДНАННЯ В ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

## **МАТЕРІАЛИ**

**IX міжнародної  
науково-технічної конференції  
25–27 вересня 2023 року**

Краматорськ  
ДДМА  
2023

<b>Трембач І. О., Гринь О. Г.</b> Обґрунтування можливості використання манганової руди в складі самозахисного порошкового дроту.....	118
<b>Турчанін М. А., Корнієнко К.Є., Великанова Т. Я.</b> Діяльність української комісії з діаграм стану та термодинаміки у 2021–2022 роках.....	120
<b>Турчанін М. А., Агравал П. Г., Древаль Л. О.</b> Фазові діаграми системи Со–Ті.....	122
<b>Турчанін М. А., Корсун В. А., Агравал П. Г., Водоп'янова Г. О., Древаль Л. О.</b> Термодинамічні властивості рідких сплавів трикомпонентної аморфоутворюючої системи Со–Ті–Zr.....	124
<b>Турчанін М. А., Агравал П. Г., Корсун В. А., Водоп'янова Г. О., Сарана К. С., Древаль Л. О.</b> Ентальпії змішування рідких сплавів трикомпонентної аморфоутворюючої системи Со–Ni–Ті при 1873 К .....	127
<b>Турчанін М. А., Агравал П. Г., Водоп'янова Г. О., Корсун В. А., Древаль Л. О.</b> Температурно-концентраційна залежність термодинамічних властивостей аморфоутворюючих розплавів Со–Cu–Ni–Ті–Zr та Со–Cu–Ni–Ті–Hf.....	129
<b>Турчанін М. А., Агравал П. Г., Водоп'янова Г. О., Корсун В. А., Древаль Л. О.</b> Близький хімічний порядок у розплавах Со–Cu–Ni–Ті–Zr, Со–Cu–Ni–Ті–Hf і прогнозовані концентраційні області їх аморфізації .....	131
<b>Уткін С. В., Кублій В. З., Бондар А. А., Слепцов С. В.</b> Фазові рівноваги у кобальтовому куті системи Мо–Со–В при субсолідусних температурах .....	133
<b>Федоров М. М., Дьяченко Ю. Г.</b> Дослідження впливу мікродобавок холоднонабухаючого крохмалю на властивості піщано-бентонітових сумішей для формування «по-сирому» .....	134
<b>Фесенко А. М., Фесенко М. А.</b> Способи виготовлення чавунних виливків із функціонально-градієнтною структурою .....	136
<b>Фесенко М. А., Фесенко А. М.</b> Застосування технології модифікувального оброблення розплаву чавуну для отримання потрібної структури й підвищення експлуатаційних властивостей виливків.....	139
<b>Фон Прусс М. А.</b> Вплив комплексного модифікування на нейтралізацію залізовмісних фаз ливарного сплаву AlSi9Cu3 з підвищеним вмістом заліза до 2 % мас.....	141
<b>Хричиков В. Є., Білий О. П., Меньяло О. В., Стомба В. М.</b> Кристалізація та властивості чавуну у виливках.....	143
<b>Царюк Д. В., Прядко Т. В., Носенко В. К., Носенко А. В., Судацова В. С.</b> Енергія міжатомної взаємодії в розплавах систем Mg–Si і Al–Mg–Si.....	145
<b>Царюк Д. В., Прядко Т. В., Носенко В. К., Носенко А. В., Судацова В. С.</b> Термодинамічні властивості і фазові рівноваги у сплавах системи Al–Mg–Ge і подвійних граничних підсистемах.....	147

За результатами розрахунку діаграми метастабільних фазових перетворень за участю твердих розчинів ( $\beta\text{Co}$ ) і ( $\beta\text{Ti}$ ), переохоложені розплави в широкому інтервалі складів демонструють відносну термодинамічну стабільність, рис. 1, б. Прогнозований концентраційний інтервал утворення швидкозагартованих аморфних сплавів становить  $x_{\text{Ti}} = 0,32\text{--}0,79$ , а об'ємних аморфних сплавів –  $x_{\text{Ti}} = 0,40\text{--}0,68$ .

Розрахована нами діаграма метастабільних фазових перетворень між рідкими сплавами та ГЦК, ОЦК і ГПУ розчинами на основі чистих компонентів, рис. 1, в, дає такі результати для граничної розчинності елементів:  $x_{\text{Co}} = 0,14$  при 1215 К в ( $\beta\text{Ti}$ ) фазі;  $x_{\text{Co}} = 0,04$  при 789 К в ( $\alpha\text{Ti}$ ) фазі;  $x_{\text{Ti}} = 0,237$  при 826 К ( $\beta\text{Co}$ ) фазі. Гранична температура феромагнітного перетворення  $T_{\text{mag}}$  в метастабільній ( $\beta\text{Co}$ ) фазі може знижуватись до 659К, що значно менше температури 1129 К, властивої для рівноважних сплавів.

На рис. 1, г показана діаграма метастабільних фазових перетворень, розрахована за участі рідких сплавів та ГЦК фаз, де ( $\beta\text{Co}$ ) –  $\gamma$ -фаза,  $\text{Co}_3\text{Ti}$  –  $\gamma'$ -фаза і  $\text{CoTi}_3$  – метастабільна проміжна фаза, антиструктурна до  $\gamma'$ -фази. Видно, що ширина області гомогенності  $\text{Co}_3\text{Ti}$  в умовах метастабільного синтезу значно розширюється і може сягати  $x_{\text{Ti}} = 0,21\text{--}0,31$  при 1123 К. Порівняння рис. 1, в і рис. 1, г вказує на неможливість утворення метастабільної  $\text{CoTi}_3$  фази з розплаву.

Розроблений термодинамічний опис відтворює фазові перетворення, важливі для одержання в системі жароміцних ливарних сплавів на основі кобальту з каркасим зміцненням структури ( $\gamma/\gamma'$  суперсплави) і аморфних сплавів. Структура нового термодинамічного опису системи вперше дозволяє його одночасне включення в бази даних для розробки багатокомпонентних жароміцних і аморфних промислових матеріалів.

## ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКИХ СПЛАВІВ ТРИКОМПОНЕНТНОЇ АМОРФУТВОРЮЮЧОЇ СИСТЕМИ Co–Ti–Zr

Турчанін М. А., Корсун В. А., Агравал П. Г., Водоп'янова Г. О.,  
(м. Краматорськ, ДДМА), Древаль Л. О. (м. Штутгарт, MSI)

Рідкі сплави системи Co–Ti–Zr є об'єктом досліджень, спрямованих на розробку та отримання нових аморфних сплавів. Тож метою цієї роботи є дослідження термодинамічних властивостей рідких сплавів даної системи.

Парціальна ентальпія змішування титану  $\Delta_m \bar{H}_{\text{Ti}}$  в рідких сплавах системи Co–Ti–Zr була вивчена калориметричним методом при 1873 К

вздовж променевого перерізу  $x_{Co}/x_{Zr} = 3$  в інтервалі складів  $x_{Ti} = 0-0,54$ , парціальна ентальпія змішування цирконію  $\Delta_m \bar{H}_{Zr}$  – при 1873 К вздовж променевого перерізу  $x_{Co}/x_{Ti} = 3$  в інтервалі складів  $x_{Zr} = 0-0,57$ . Концентраційні залежності парціальних функцій були апроксимовані відповідними виразами: вздовж перерізу  $x_{Co}/x_{Zr} = 3$

$$\Delta_m \bar{H}_{Ti} = (1 - x_{Ti})^2 (-85,7 + 39,6x_{Ti}) \text{ кДж/моль}; \quad (1)$$

вздовж перерізу  $x_{Co}/x_{Ti} = 3$

$$\Delta_m \bar{H}_{Zr} = (1 - x_{Zr})^2 (-110,4 + 30,3x_{Zr}) \text{ кДж/моль}. \quad (2)$$

Значення інтегральної ентальпії змішування  $\Delta_m H$  уздовж досліджених перерізів (рис. 1, а, б) були визначені інтегруванням рівняння Гіббса-Дюгема.

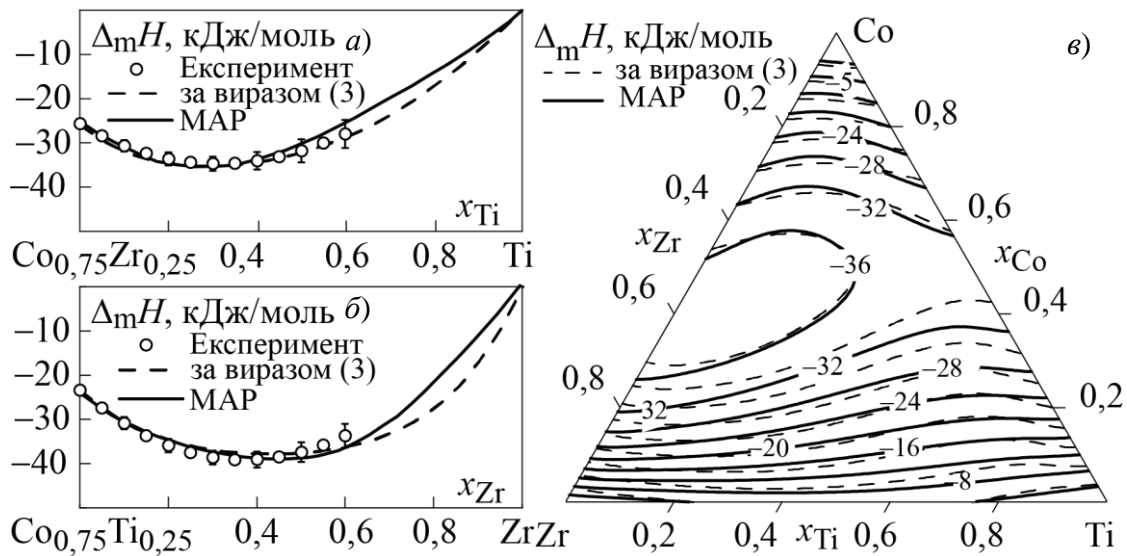


Рис. 1. Інтегральна ентальпія змішування  $\Delta_m H$  (кДж/моль) розплавів системи Co–Ti–Zr при 1873 К вздовж досліджених перерізів (а, б) та на концентраційному трикутнику (в) за результатами експериментів (круглі символи), розрахована в рамках МАР (безперервні лінії), та відповідно до рівняння (3) (штрихові лінії)

Концентраційна залежність інтегральної ентальпії змішування розплавів Co–Ti–Zr на трикутнику Гіббса була описана виразом:

$$\begin{aligned} \Delta_m H = & x_{Co}x_{Ti}(-133,546 + 22,711(x_{Co} - x_{Ti}) + 4,656(x_{Co} - x_{Ti})^2 - \\ & - 29,641(x_{Co} - x_{Ti})^3) + x_{Co}x_{Zr}(-145,330 + 47,190(x_{Co} - x_{Zr}) - \\ & - 72,680(x_{Co} - x_{Zr})^2 + 21,070(x_{Co} - x_{Zr})^3) + x_{Ti}x_{Zr}(-21,7) + \\ & + x_{Co}x_{Ti}x_{Zr}(-250,9x_{Co} + 289,6x_{Ti} - 25,0x_{Zr}) \text{ кДж/моль}. \quad (3) \end{aligned}$$

Поверхню ізотерми інтегральні ентальпії змішування рідких сплавів Co–Ti–Zr при 1873 К, побудовану відповідно до (3), показано на рис. 1, в у вигляді набору штрихових ліній. З даного рисунку видно, що для функції  $\Delta_m H$  характерні від’ємні значення на всьому концентраційному трикутнику, які зумовлені характером відхилень від ідеальності термодинамічних фун-

кцій змішування в системах Co–Zr і Co–Ti і домінуючими парними взаємодіями CoZr і CoTi в трикомпонентних розплавах.

Для опису інтегральної ентальпії змішування розплавів системи Co–Ti–Zr було використано модель асоційованого розчину (МАР), результати розрахунку за якою показані на рис.1 безперервними лініями. Круглими символами на рис. 1, *а, б* показані експериментальні значення  $\Delta_m H$  уздовж досліджених перерізів. Розраховані відповідно МАР величини задовільно узгоджуються з експериментальними даними і знаходяться в межах похибки експериментальних даних. З використанням отриманих параметрів МАР були розраховані інші термодинамічні функції змішування, такі як надлишкова енергія Гіббса змішування  $\Delta_m G^{ex}$ , надлишкова ентропія змішування  $\Delta_m S^{ex}$  розплавів системи Co–Ti–Zr, рис. 2.

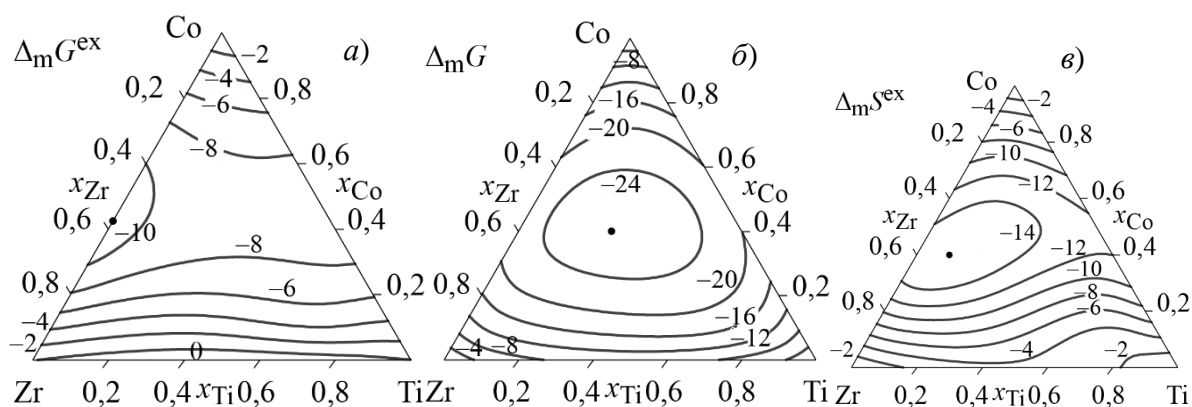


Рис. 2 Термодинамічні функції змішування розплавів системи Co–Ti–Zr, розраховані в рамках МАР при 1873 К: *а)*  $\Delta_m G^{ex}$ , кДж/моль; *б)*  $\Delta_m G$ , кДж/моль; *в)*  $\Delta_m S^{ex}$  Дж/(моль·К)

Від’ємні значення функції  $\Delta_m G^{ex}$  свідчать про стабілізацію рідкої фази при її утворенні з чистих компонентів. Мінімальне значення функції становить  $-11,2$  кДж/моль для сплаву  $Co_{0,425}Zr_{0,575}$ , рис. 2, *а*. Мінімальне значення функції  $\Delta_m G$ , рис. 2, *б*, знаходиться в області потрійних сплавів і досягає  $-25,9$  кДж/моль при складі  $Co_{0,425}Ti_{0,250}Zr_{0,325}$ . Від’ємні значення функції  $\Delta_m S^{ex}$  (рис. 2, *в*) в рамках МАР можуть бути пов’язані з хімічним упорядкуванням в розплавах, якому в рамках МАР у відповідність може бути поставлене утворення двокомпонентних асоціатів складу  $Co_2Ti$ ,  $CoTi$ ,  $CoTi_2$ ,  $Co_3Zr$ ,  $CoZr$ ,  $CoZr_2$ .