

**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

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

змішування розплавів $\Delta_m H$, яка в широкому інтервалі температур зберігає великі від'ємні значення. При цьому, відносний внесок ідеальної складової $\Delta_m G^{id}$ в енергію Гіббса змішування змінюється в межах 71...92 % при 1873 К і 23...36 % при 800 К. Розраховані значення надлишкової ентропії змішування $\Delta_m S^{ex}$ вказують на значне упорядкування в аморфоутворюючих розплавах, яке збільшується зі зниженням температури. Також показано, що еквіатомні багатокомпонентні розплави або близькі до них за складом композиції мають найвищу термодинамічну стабільність в відповідних системах і зберігають її в широкому інтервалі температур.

ЛІТЕРАТУРА

1. Турчанін М. А., Агравал П. Г., Водоп'янова А. А. Термодинамические свойства многокомпонентных аморфообразующих жидких сплавов // УХЖ. 2018. Т. 84, № 5 С. 34–49.

БЛИЖНІЙ ХІМІЧНИЙ ПОРЯДОК У РОЗПЛАВАХ Co–Cu–Ni–Ti–Zr, Co–Cu–Ni–Ti–Hf І ПРОГНОЗОВАНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ОБЛАСТІ ЇХ АМОРФІЗАЦІЇ

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

Для пошуку складів нових аморфних металевих матеріалів може бути використане розроблене нами емпіричне правило, що пов'язує концентраційну область аморфізації загартуванням з рідини з уявленнями феноменологічної моделі асоційованого розчину (МАР) про ближній хімічний порядок в них. Згідно з цим правилом, аморфізація загартуванням з рідини перебігає успішно для розплавів, сумарна молярна частка асоціатів Σx_{assoc} в яких, при температурах близьких до температури склування, перевищує 0,3.

У даній роботі для розрахунку складу асоційованого розчину в розплавах Co–Cu–Ni–Ti–Zr та Co–Cu–Ni–Ti–Hf була використана термодинамічна база даних [1], що спирається на параметри взаємодії компонентів в розплавах граничних дво- і трикомпонентних систем і описує термодинамічні властивості розплавів з використанням МАР.

Приклади розрахунку складу асоційованого розчину, виконані для сплавів Co–Cu–Ni–Ti–Zr при 800 К для перерізів між чистими металами і еквіатомними сплавами в граничних чотирикомпонентних системах, представлені на рис. 1. Як видно з рисунку, в розплавах п'ятикомпонентних систем наявна інтенсивна взаємодія компонентів, властива граничним дво-, три- і чотирикомпонентним системам. Вона обумовлена різницею хімічних

властивостей перехідних металів другої половини 3d-ряду (Co, Ni, Cu), з одного боку, і IVB-металів (Ti, Zr, Hf), з іншого боку. Ця взаємодія призводить, до значних від'ємних відхилень від ідеальності термодинамічних функцій змішування розплавів і суттєвого хімічного упорядкування в розплавах. В рамках моделі асоційованого розчину таке хімічне упорядкування пов'язане з утворенням асоціатів з одноатомних частинок, а його кількісною мірою є сумарна мольна частка асоціатів Σx_{assoc} в асоційованому розчині. Для розплавів розглянутих п'ятикомпонентних систем в широкому інтервалі складів ступінь подібного упорядкування є високою і може досягати величини Σx_{assoc} більше 0,9. Зміна ступеню упорядкування вздовж перерізів по концентрації перехідних металів другої половини 3d-ряду є подібною. Найбільші значення Σx_{assoc} спостерігаються для концентраційних областей, наближених до відповідних чотирикомпонентних еквіатомних сплавів. Для ступеню упорядкування в перерізах по концентрації IVB-металів характерним є досягнення максимальних значень Σx_{assoc} у п'ятикомпонентній області.

Цікавим результатом розрахунку стало те, що для кожного з розглянутих перерізів еквіатомний сплав CoCuNiTiZr не відповідає точно концентраційній області максимального упорядкування в п'ятикомпонентній системі.

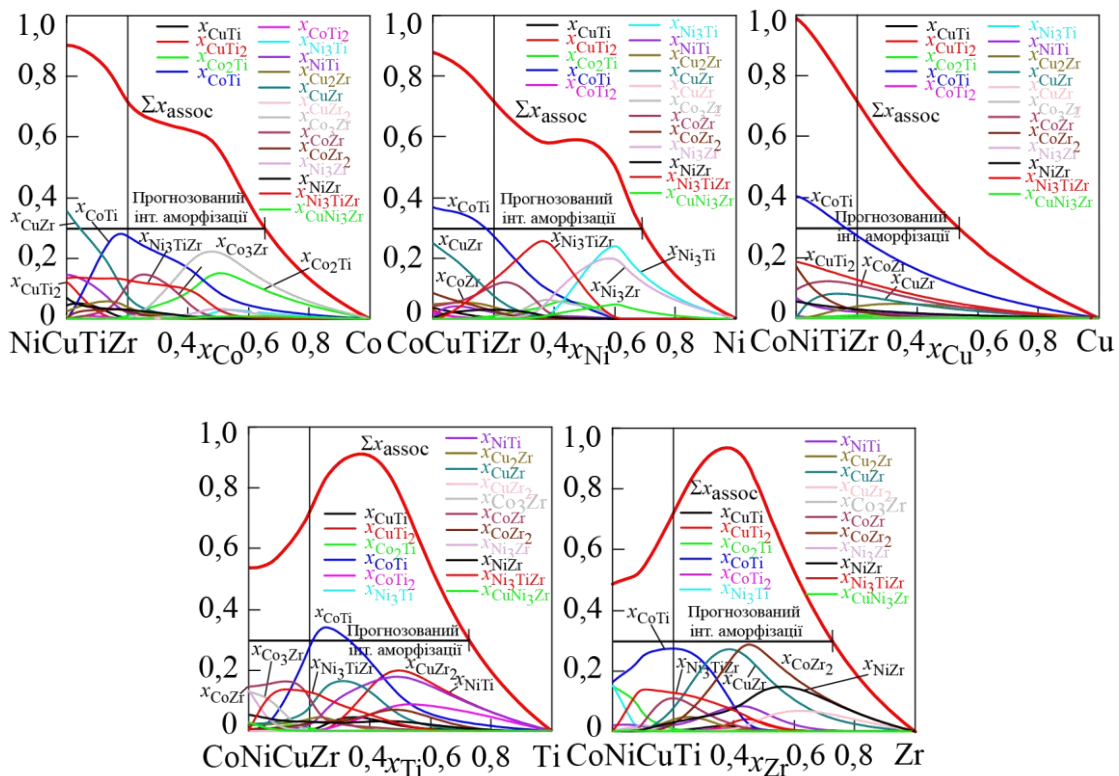


Рис. 1. Розраховані при $T = 800$ К сумарна мольна частка Σx_{assoc} (жирні лінії), мольні долі асоціатів (різні кольорові лінії) і прогнозовані області аморфізації розплавів Cu–Co–Ni–Ti–Zr

Прогнозовані в даній роботі концентраційні області аморфізації розплавів систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr та Co–Cu–Ni–Ti–Hf вказують на визначальний вплив фактору хімічної взаємодії на можливий склад аморфних сплавів. А саме, для успішної аморфізації розплав має одночасно містити певну концентрацію металів, що є акцепторами та донорами електронів. Таке співвідношення компонентів буде забезпечувати їх інтенсивну хімічну взаємодію і сприяти високій термодинамічній стабільності утвореної рідкої фази, що визначає її здатність до аморфізації. Для багатокомпонентних розплавів Co–Cu–Ni–Ti–Zr та Co–Cu–Ni–Ti–Hf ми прогнозуємо отримання аморфних сплавів при одночасному виконанні умов $\Sigma x_{TM} > 0,25$ и $\Sigma x_{IVB} > 0,28$, де Σx_{TM} це сумарна мольна частка Co, Ni, та Cu, які є акцепторами електронів, а Σx_{IVB} це сумарна мольна частка Ti, Zr і Hf, які є донорами електронів. Запропонований підхід до визначення складу аморфних сплавів за граничним вмістом металів-донорів і металів-акцепторів відкриває широкі можливості для розробки нових композицій на основі багатокомпонентних систем перехідних металів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Турчанин М. А., Агравал П. Г., Водопьянова А. А. Термодинамические свойства многокомпонентных аморфообразующих жидких сплавов // УХЖ. 2018. Т. 84, № 5. С. 34–49.

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ У КОБАЛЬТОВОМУ КУТІ СИСТЕМИ Mo–Co–B ПРИ СУБСОЛІДУСНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Уткін С. В., Кублій В. З., Бондар А. А., Слепцов С. В.
(ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України)

Сплави в області складів, багатих на кобальт, було приготовано у електродуговій печі з електролітичного кобальту, а також використовуючи кобальт-боридну та інтерметалідну лігатури, приготовані у тих самих умовах. За вихідні матеріали використали чорний аморфний бор (вміст домішки вуглецю 0,02–0,05 мас. %), а також переплавлені електролітичний кобальт та молібден (99,97 мас. %). Вміст домішок контролювали шляхом спектрального та хімічного аналізів. Температури початку плавлення сплавів у литому стані визначали за пірометричним методом Пірані-Альтертума. Відпалені при субсолідусних температурах зразки (на 30–50 °С нижче початку плавлення) було досліджено методами рентгенівського фазового аналізу (РФА) та металографії (сканувальна електронна мікроскопія з локальним рентгеноспектральним аналізом – СЕМ/ЛРСА).



**ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА
АКАДЕМІЯ**

Materials Science International



**Лабораторія «Фізико-хімічні властивості металевих
розплавів»**

**БЛИЖНІЙ ХІМІЧНИЙ ПОРЯДОК У РОЗПЛАВАХ
Co–Cu–Ni–Ti–Zr, Co–Cu–Ni–Ti–Hf І
ПРОГНОЗОВАНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ОБЛАСТІ ЇХ
АМОРФІЗАЦІЇ**

**Турчанін М. А., Агравал П. Г., Водоп'янова Г. О., Корсун В.А.,
Древаль Л. О.**

E-mail: phch@dgma.donetsk.ua

СКЛАДИ АМОΡΦΝΙΧ СПЛАВІВ В СИСТЕМАХ Co–Cu–Ni–Ti–Zr ТА Co–Cu–Ni–Ti–Hf

трикомпонентні аморфні сплави	<p>Cu–Ti–Zr (127 compositions), Cu–Ni–Ti (33 compositions), Cu–Ni–Zr (52 compositions), Cu–Ni–Hf (68 compositions), Ni–Ti–Zr (26 compositions), Ni–Zr–Hf (11 compositions)</p>
чотирикомпонентні аморфні сплави	<p>Cu–Ti–Zr–Hf ($\text{Cu}_{25}\text{Hf}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Zr}_{25}$, $\text{Cu}_{60}\text{Hf}_{10}\text{Ti}_{10}\text{Zr}_{20}$), Cu–Ni–Ti–Zr ($\text{Cu}_{47}\text{Ni}_8\text{Ti}_{34}\text{Zr}_{11}$), Cu–Ni–Ti–Hf ($\text{Cu}_{25}\text{Hf}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Ti}_{25}$), Fe–Ti–Zr–Hf ($\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Zr}_{25}$), Ni–Ti–Zr–Hf ($\text{Ni}_{25}\text{Hf}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Zr}_{25}$), $\text{Al}_8\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{27}$, $\text{Al}_{10}\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{25}$, $\text{Ni}_{57}\text{Pd}_5\text{Ti}_{18}\text{Zr}_{20}$, $\text{Ni}_{57}\text{Pd}_{10}\text{Ti}_{13}\text{Zr}_{20}$, $\text{Hf}_5\text{Nb}_{20}\text{Ni}_{60}\text{Ti}_{15}$, $\text{Hf}_{10}\text{Nb}_{20}\text{Ni}_{60}\text{Ti}_{10}$, $\text{Hf}_5\text{Nb}_{10}\text{Ni}_{60}\text{Ti}_{25}$.</p>
п'ятикомпонентні аморфні сплави	<p>CoCuTiZrHf ($\text{Co}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), CuFeTiZrHf ($\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), CuCrTiZrHf ($\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), CuMnTiZrHf ($\text{Cu}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), CuNiTiZrHf ($\text{Cu}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), CuVTiZrHf ($\text{Cu}_{20}\text{V}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), FeNiTiZrHf ($\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Hf}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$), $\text{Cu}_{47}\text{Si}_1\text{Ti}_{11}\text{Zr}_{11}\text{Ni}_8$, $\text{B}_{20}\text{Co}_7\text{Fe}_{56}\text{Ni}_7\text{Zr}_{10}$, $\text{Al}_{10}\text{Cu}_5\text{Ti}_{17}\text{Ni}_{40}\text{Zr}_{28}$, $\text{Al}_{10}\text{Cu}_{20}\text{Ti}_5\text{Ni}_8\text{Zr}_{57}$, $\text{Be}_{25}\text{Cu}_{10}\text{Ti}_{11}\text{Ni}_{10}\text{Zr}_{44}$, $\text{Be}_{20}\text{Cu}_{20}\text{Ti}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Zr}_{20}$.</p>
шестикомпонентні аморфні сплави	<p>$\text{B}_{20}\text{Co}_7\text{Fe}_{56}\text{Nb}_2\text{Ni}_7\text{Zr}_8$, $\text{B}_{15}\text{Co}_7\text{Fe}_{61}\text{Nb}_2\text{Ni}_7\text{Zr}_8$, $\text{B}_{20}\text{Co}_7\text{Fe}_{56}\text{Ni}_7\text{Ta}_2\text{Zr}_8$, $\text{Al}_{10}\text{Cu}_6\text{Si}_1\text{Ti}_{15}\text{Ni}_{39}\text{Zr}_{29}$.</p>

МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Мета роботи полягає в прогнозуванні концентраційних областей аморфізації розплавів систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf і чотирикомпонентних систем, що входять до їх складу.

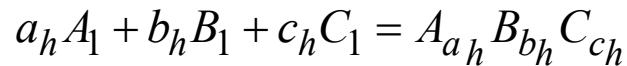
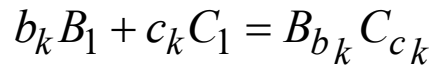
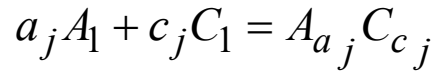
Задачі, поставлені в роботі:

1. Розрахунок складу асоційованого розчину в розплавах Co–Cu–Ni–Ti–Zr та Co–Cu–Ni–Ti–Hf та оцінка ближнього хімічного порядку в них.
2. Прогнозування концентраційних областей аморфізації розплавів систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf з використанням розробленого нами емпіричного правила, що пов'язує концентраційну область аморфізації загартуванням з рідини з уявленнями феноменологічної моделі асоційованого розчину (МАР) про ближній хімічний порядок в них.

ХІМІЧНЕ ВПОРЯДКУВАННЯ В РОЗПЛАВАХ ТРИКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМ ТА МОДЕЛЬ АСОЦІЙОВАНОГО РОЗЧИНУ

4

Реакції утворення асоціатів



Компоненти асоційованого розчину

Мономери A_1 , B_1 та C_1 ;

Двокомпонентні асоціати $A_{a_j} C_{c_j}$ та $B_{b_k} C_{c_k}$;

Трикомпонентні асоціати $A_{a_h} B_{b_h} C_{c_h}$

Константи рівноваги реакцій утворення асоціатів

$$K_j = \exp\left(\frac{\Delta_{\text{assoc}} S_{A_{a_j} C_{c_j}}}{R} - \frac{\Delta_{\text{assoc}} H_{A_{a_j} C_{c_j}}}{RT}\right) = \frac{x_{A_{a_j} C_{c_j}}}{x_{A_1}^{a_j} x_{C_1}^{c_j}}$$

$$K_k = \exp\left(\frac{\Delta_{\text{assoc}} S_{B_{b_k} C_{c_k}}}{R} - \frac{\Delta_{\text{assoc}} H_{B_{b_k} C_{c_k}}}{RT}\right) = \frac{x_{B_{b_k} C_{c_k}}}{x_{B_1}^{b_k} x_{C_1}^{c_k}}$$

$$K_h = \exp\left(\frac{\Delta_{\text{assoc}} S_{A_{a_h} B_{b_h} C_{c_h}}}{R} - \frac{\Delta_{\text{assoc}} H_{A_{a_h} B_{b_h} C_{c_h}}}{RT}\right) = \frac{x_{A_{a_h} B_{b_h} C_{c_h}}}{x_{A_1}^{a_h} x_{B_1}^{b_h} x_{C_1}^{c_h}}$$

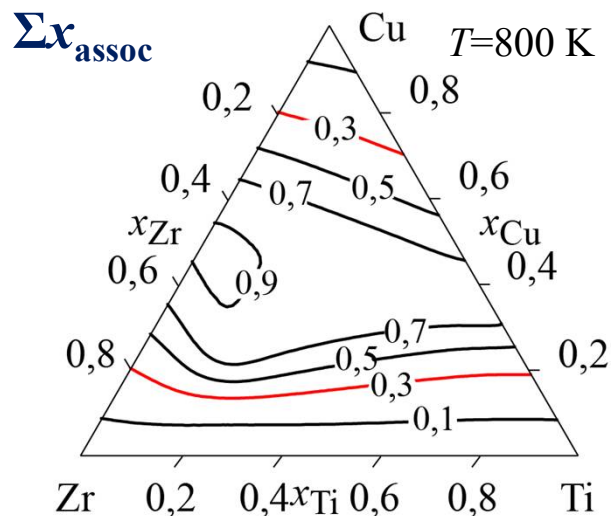
Відповідно до формалізму моделі:

- Сумарна мольна частка асоціатів Σx_{assoc} характеризує ступінь ближнього хімічного порядку
- Концентрації асоціатів і мономерів регулюються рівновагами реакцій утворення асоціатів
- Зі зниженням температури сумарна мольна частка асоціатів Σx_{assoc} зростає

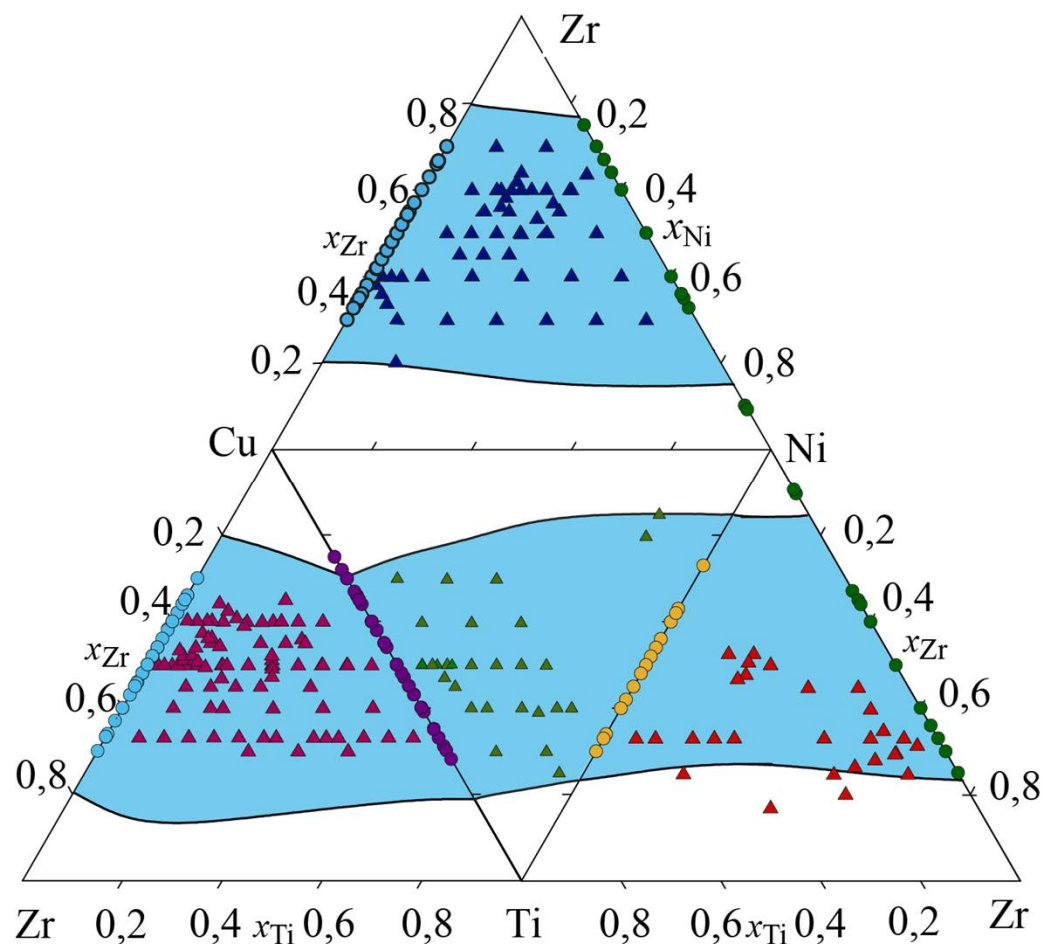
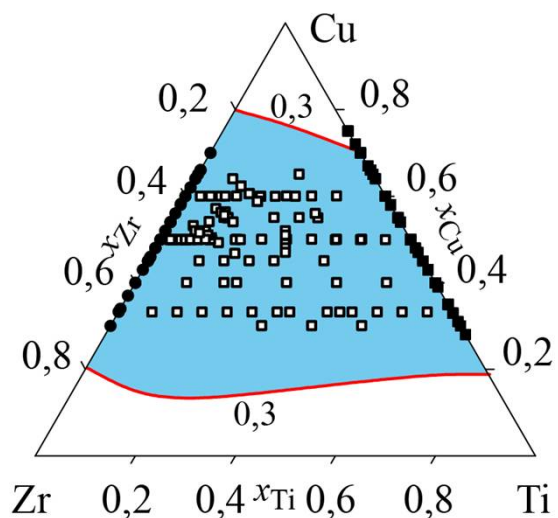
ЕМПІРИЧНЕ ПРАВИЛО: аморфізація притаманна розплавам, склад асоційованого розчину для яких при температурі аморфізації відповідає умові $\Sigma x_{\text{assoc}} > 0,3$

СУМАРНА МОЛЬНА ЧАСТКА АСОЦІАТИВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ВСТАНОВЛЕНІ СКЛАДИ АМОРФНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМ Cu–Ti–Zr, Cu–Ni–Ti, Cu–Ni–Zr ТА Ni–Ti–Zr

5



Прогнозована концентраційна
область аморфізації

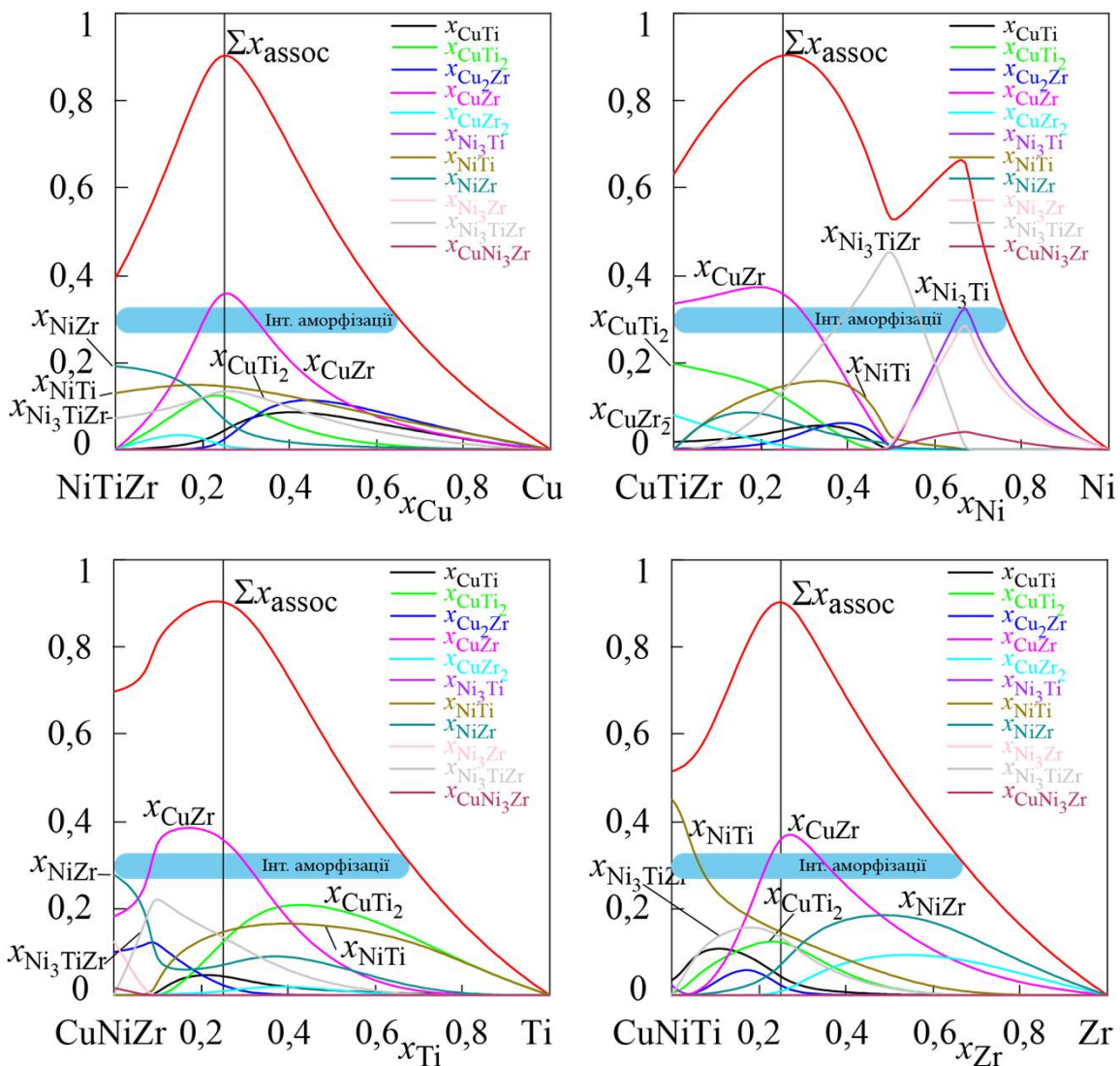


○ – склади двокомпонентних аморфних сплавів

△ – склади трикомпонентних аморфних сплавів

МОЛЬНІ ЧАСТКИ І СУМАРНА МОЛЬНА ЧАСТКА АСОЦІАТИВ ТА ПРОГНОЗОВАНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ІНТЕРВАЛИ АМОРФІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ ЧОТИРИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ Cu–Ni–Ti–Zr

6



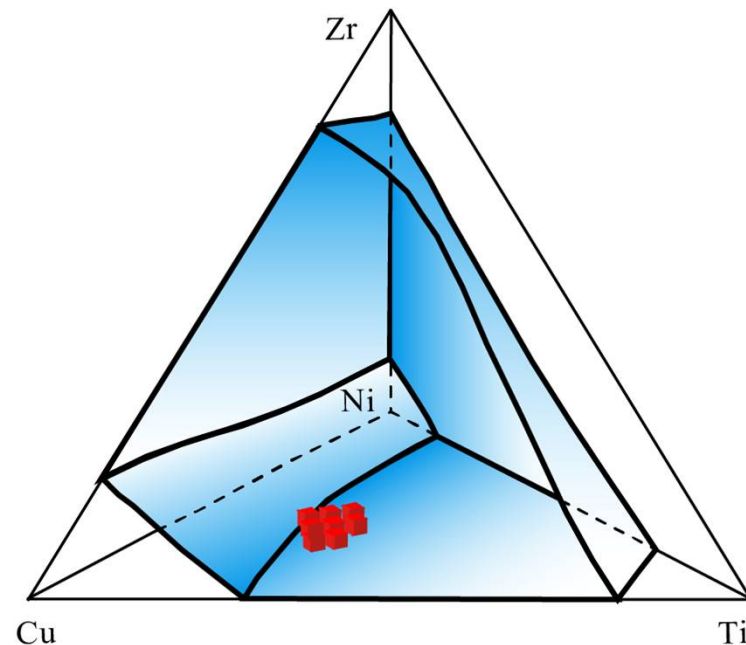
Прогнозовані інтервали аморфізації складають:

перетин NiTiZr–Co – $x_{Co} = 0-0,73$;

перетин CoTiZr–Ni – $x_{Ni} = 0-0,76$;

перетин CoNiZr–Ti – $x_{Ti} = 0-0,67$;

перетин CoNiTi–Zr – $x_{Zr} = 0-0,69$

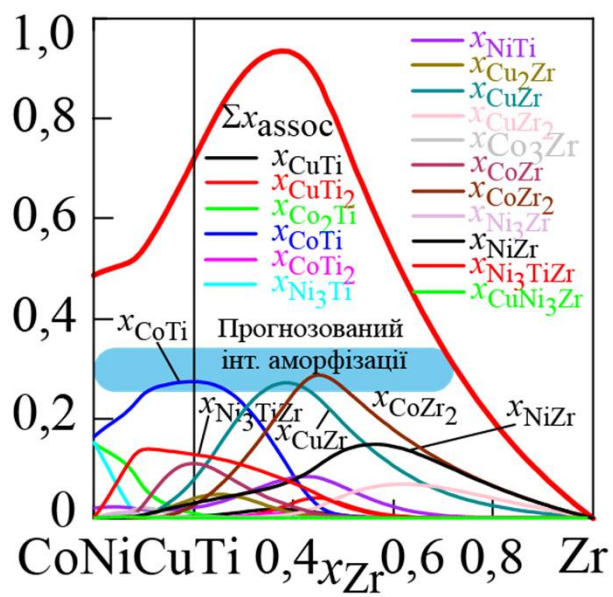
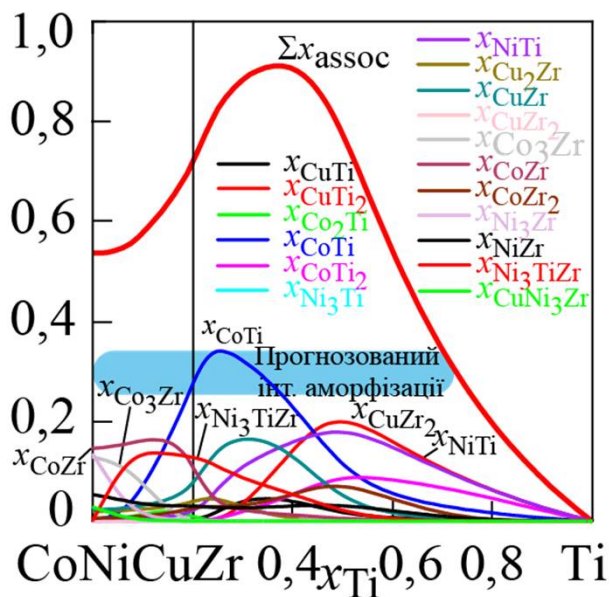
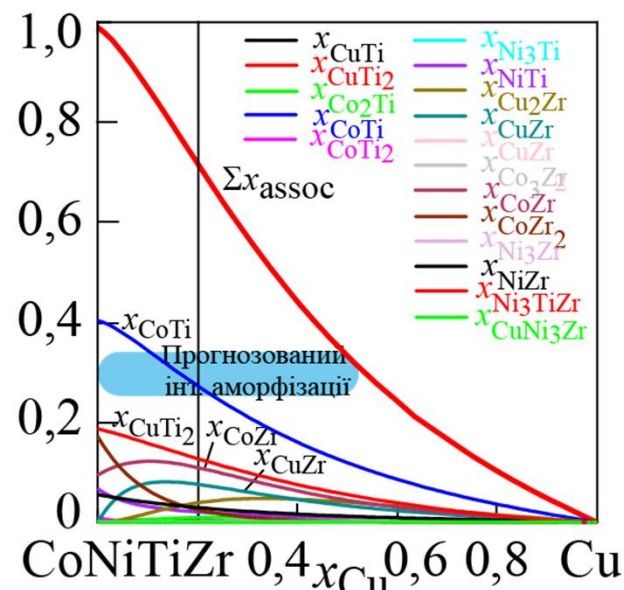
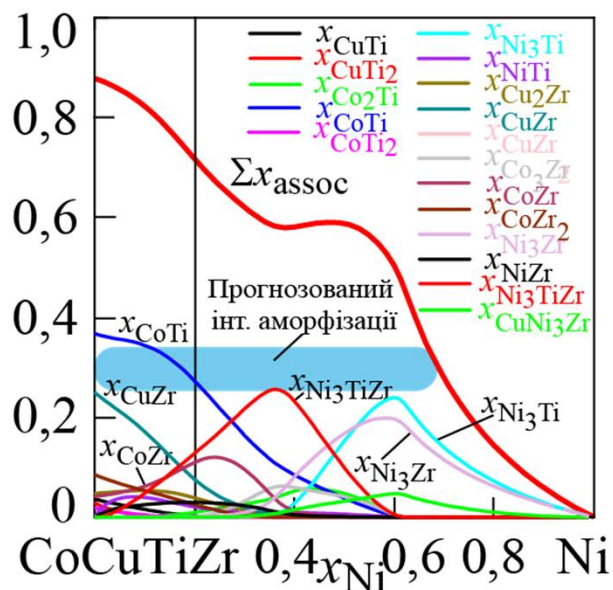
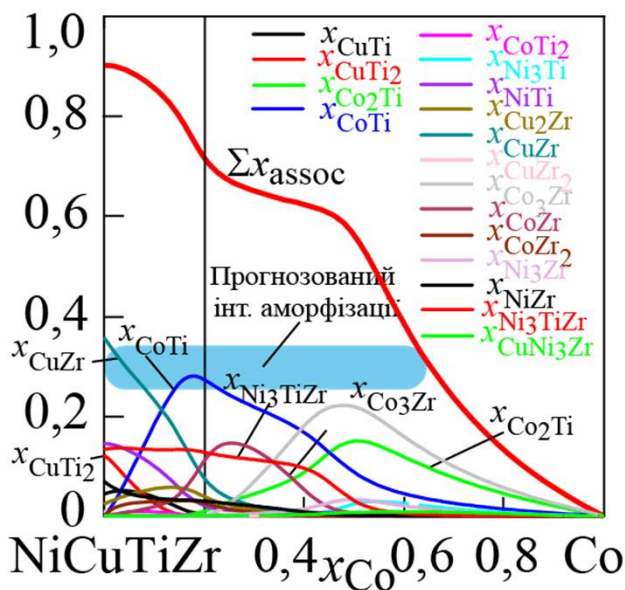


■ – склади чотирикомпонентних аморфних сплавів

Аморфні сплави отримані литтям в мідну форму, діаметр прутків до 5 мм [Yang, 2007]

МОЛЬНІ ЧАСТКИ І СУМАРНА МОЛЬНА ЧАСТКА АСОЦІАТИВ ТА ПРОГНОЗОВАНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ОБЛАСТІ АМОРФІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ П'ЯТИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ Co–Cu–Ni–Ti–Zr

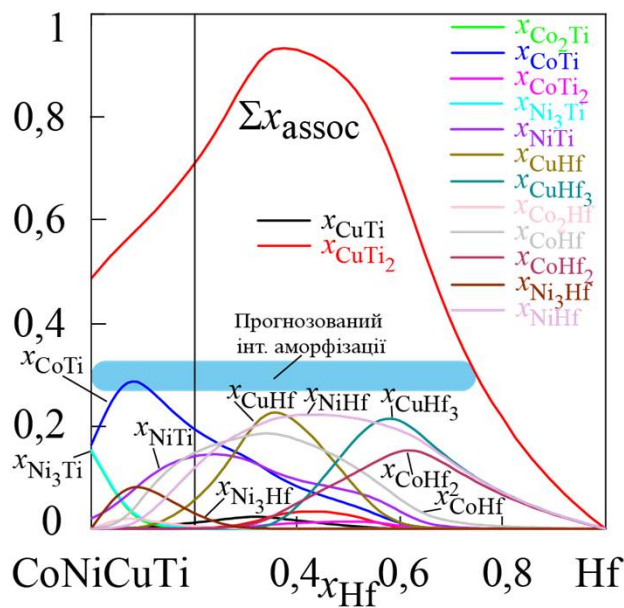
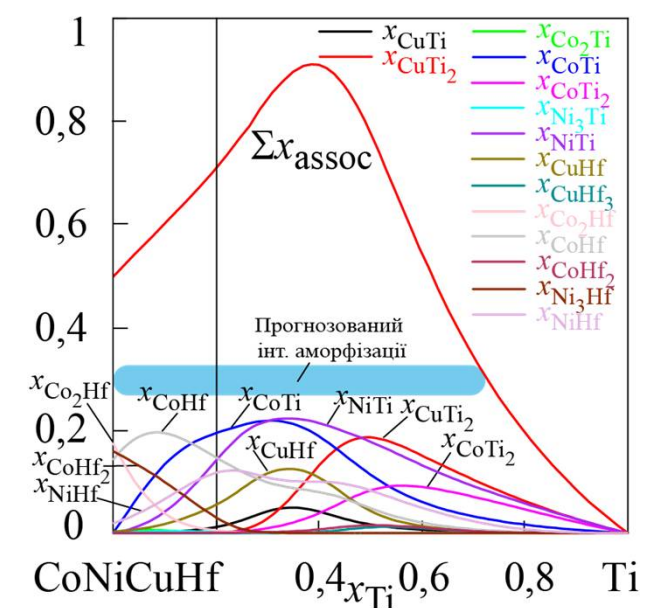
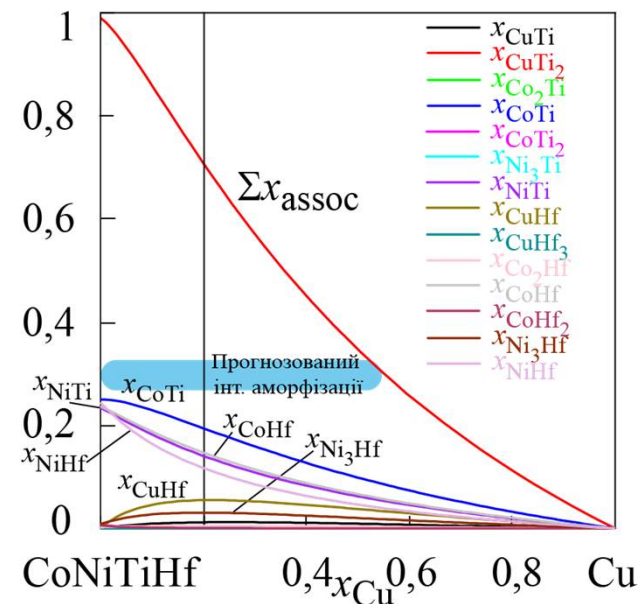
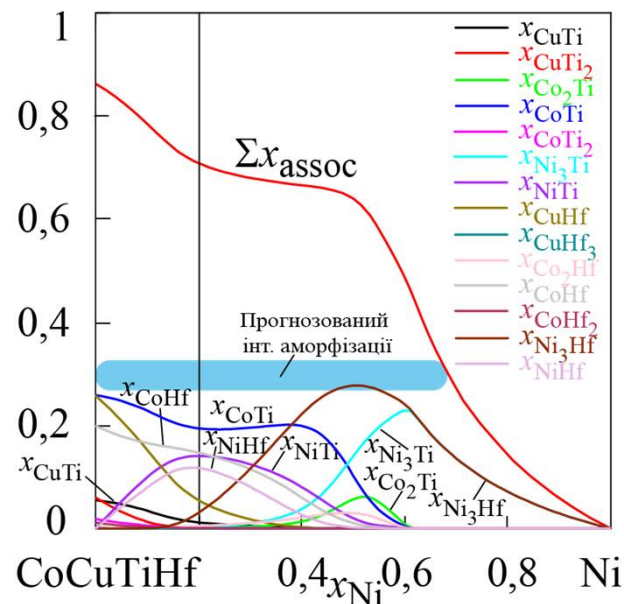
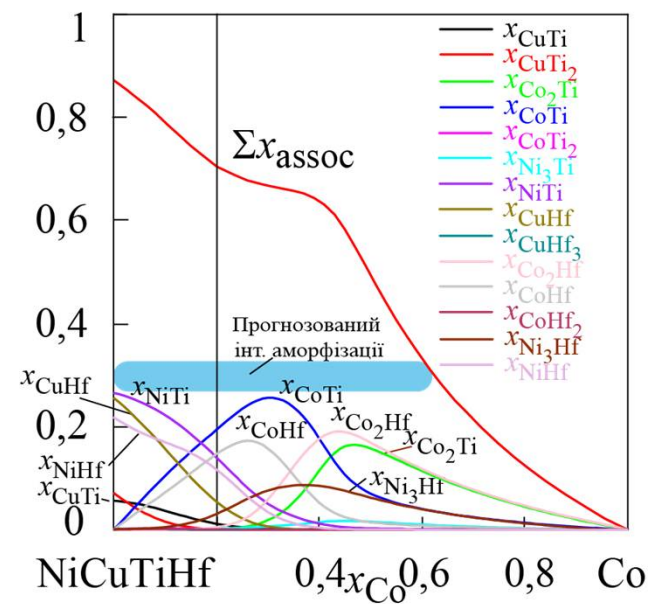
7



Прогнозовані інтервали аморфізації складають:
 перетин NiCuTiZr–Co – $x_{Co} = 0-0,66$;
 перетин CoCuTiZr–Ni – $x_{Ni} = 0-0,67$;
 перетин CoNiTiZr–Cu – $x_{Cu} = 0-0,53$;
 перетин CoNiCuZr–Ti – $x_{Ti} = 0-0,72$;
 перетин CoNiCuTi–Zr – $x_{Zr} = 0-0,72$

МОЛЬНІ ЧАСТКИ І СУМАРНА МОЛЬНА ЧАСТКА АСОЦІАТИВ ТА ПРОГНОЗОВАНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ОБЛАСТІ АМОРФІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ П'ЯТИКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ Co–Cu–Ni–Ti–Hf

8



Прогнозовані інтервали аморфізації складають:
 перетин NiCuTiHf–Co – $x_{\text{Co}} = 0–0,64$;
 перетин CoCuTiHf–Ni – $x_{\text{Ni}} = 0–0,68$;
 перетин CoNiTiHf–Cu – $x_{\text{Cu}} = 0–0,55$;
 перетин CoNiCuHf–Ti – $x_{\text{Ti}} = 0–0,72$;
 перетин CoNiCuTi–Hf – $x_{\text{Hf}} = 0–0,75$

1. Вперше розроблена самоузгоджена база даних для надлишкової енергії Гіббса розплавів Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf, що описує їх термодинамічні функції змішування.
2. Вперше з використанням розробленої бази даних розраховано склад асоційованого розчину і оцінено ступінь ближнього хімічного порядку як сумарної мольної частки асоціатів Σx_{assoc} в розплавах аморфоутворюючих чотири- та п'ятикомпонентних систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf.
3. Емпіричне правило, згідно з яким аморфізація загартуванням з рідини успішно перебігає для розплавів, в яких $\Sigma x_{\text{assoc}} > 0,3$ при температурі склування 800 К, вперше застосовано для прогнозування концентраційної області аморфізації розплавів чотири- та п'ятикомпонентних систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf.
4. Вперше визначено, що для отримання аморфних сплавів систем Co–Cu–Ni–Ti–Zr і Co–Cu–Ni–Ti–Hf загартуванням з рідкої фази необхідне одночасне виконання умов $\Sigma x_{\text{TM}} > 0,25$ и $\Sigma x_{\text{IVB}} > 0,28$, де Σx_{TM} це сумарна мольна частка Co, Ni, та Cu, які є акцепторами електронів, а Σx_{IVB} це сумарна мольна частка Ti, Zr і Hf, які є донорами електронів.