

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ І ГАЗИ
У ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ**

Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції
(Запоріжжя, 26-27 листопада 2024 року)



**присвячена 125-річчю Національного університету
«Запорізька політехніка»**

Запоріжжя, 2025

УДК 669.018.28.002.669.75
H50

*Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(протокол № 6 від 28.01.2025р.)*

Упорядник: Василевська Я.А.

Відповідальний редактор:
Іванов В.Г., д-р техн. наук, доцент

H50 **Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах.**
Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції,
Запоріжжя, 26-27 листопада 2024р. [Електронний ресурс] / відпов.
редактор В.Г. ІВАНОВ. Електрон. дані. Запоріжжя : НУ
«Запорізька політехніка», 2025. 1 електрон. опт. диск (DVD-
ROM); 12 см. Назва з тит. екрана. 165 с.

ISBN 978-617-529-488-8

До збірника увійшли тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах», які відображають широкий спектр наукових досліджень в галузі ливарного виробництва, металургії чорних і кольорових металів і сплавів.

УДК 669.018.28.002.669.75

ISBN 978-617-529-488-8

Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2025

Матвейшин М.В., Петрік С.Ф.

РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ
ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ..73

СЕКЦІЯ «КОЛЬОРОВЕ ЛИТВО ТА СПЕЦМЕТАЛУРГІЯ»

Єршов А.В., Грабовський В.Я., Вініченко В.С., Савонов Ю.Н.

ВПЛИВ НАПРЯМКУ РОЗТАШУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ
НА ХАРАКТЕР МІЦНОСТІ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ..... 75

Турчанін М.А., Агравал П.Г.

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ОБ'ЄМНИХ АМОРФНИХ
СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЦИРКОНІЮ 78

Треньов М.С., Пономаренко О.І.

ЗАСТОСУВАННЯ ФУЛЕРЕНІВ У АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ 83

Єфімова В.Г., Смирнов О.М.

ФІЗИКО – ХІМІЧНІ ТА КІНЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФІЛЬТРАЦІЇ
РОЗПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ КЕРАМІЧНИХ
ФІЛЬТРІВ..... 85

**Efremenko B.V., Lekatou A., Efremenko V.G., Chabak Yu.G., Wu K.,
Arshad S., Balalayeva E.Yu.**

CHEMICAL COMPOSITION OF LAVES PHASE IN 718 INCONEL-TYPE
LPBF ALLOY MODIFIED BY SURFACE LASER MELTING..... 90

Іванченко Д. В.

МІКРОСТРУКТУРА СПЛАВУ ТИПУ АК9Ц6 ІЗ ЦИРКОНІЄМ
ВВЕДЕНИМ ІЗ ФТОРИДУ 92

**Скоробагатько Ю.П., Семенко А.Ю., Семірягін С.В., Горшков А.О.,
Ященко О.В.**

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ ОБРОБКИ РІДКОГО МЕТАЛУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ЯВИЩА ПІНЧ-ЕФЕКТУ ТА ЛОКАЛЬНОГО
РОЗРІДЖЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ
СПЛАВІВ..... 94

Селівьорстов В.Ю., Доценко Ю.В., Селівьорстова Т.В.

ВПЛИВ НА ЩІЛЬНІСТЬ ТА МАКРОСТРУКТУРУ ЛИТОГО
ВТОРИННОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al-Si ДОБАВОК
ВИСОКОДИСПЕРСНОГО SiC 101

Петруша Ю.П.

ПІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ВІДНОВЛЕННЯ
ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ..... 104

УДК 544.23:546.11'56'62'74'82'831

Турчанін М.А.¹, Агравал П.Г.²

¹ д-р хім. наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ-Тернопіль

² д-р хім. наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ-Тернопіль

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ОБ'ЄМНИХ АМОРФНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЦИРКОНІЮ

Розчинення газів у металах і сплавах відіграє важливу роль у перебігу різноманітних процесів. Аморфні сплави, які характеризуються відсутністю кристалічної структури, привертають увагу як потенційні матеріали для різних застосувань, але закономірності розчинення газів в них, як і вплив розчинених газів на їхні властивості не повністю зрозумілі.

Особливий інтерес викликає вплив розчинених газів на властивості об'ємних аморфних сплавів (ОАС), вироби з яких можуть бути одержані методами традиційних ливарних технологій. В таких сплавах розчинені гази можуть сприяти утворенню пустот або дефектів у структурі матеріалу, що може призвести до зниження механічної міцності та тривкості, та викликати хімічну корозію або окислення, що також може вплинути на їхні робочі властивості. Разом з тим, перспективним є розгляд ролі розчинених газів як легуючих компонентів ОАС. Одним з цікавих прикладів є вплив водню як легуючої добавки на властивості ОАС на основі цирконію.

В роботі [1] було досліджено аморфні зразки у вигляді пластини товщиною 2 мм з промислового цирконієвого сплаву Vit-105 MG ($Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5$ (ат %)) одержані методом лиття під тиском у мідну форму. Зарядку зразків воднем проводили після загартування електрохімічним катодним методом у розчині сірчаної кислоти. Щільність струму і час зарядки контролювали для запобігання утворення гідридів. Вміст розчиненого водню c_H в досліджених зразках становив $c_H = 0 \dots 0,5$ Н/Ме (відношення водню до металу), причому більшість досліджень було зосереджено на $c_H < 0,29$ Н/Ме, де не спостерігалось розтріскування зразків.

Проведені в [1] дослідження вказують, що розчинення водню впливає на властивості аморфних зразків, виготовлених з сплаву Vit-105 MG. Результати дослідження рентгенівської дифракції виявляє зсув максимумів на кривій інтенсивності, характерних для відстаней найближчих сусідів. У зразку, зарядженому до $c_H > 0,5$ Н/Ме (найвищий вміст водню в цій роботі), положення широких максимумів зміщене до нижчих значень 2θ відносно литого аморфного не зарядженого воднем зразка. Механічні властивості зразків вимірювали за допомогою наноіндентування при кімнатній температурі з використанням індентора Берковича, тоді як локальну

пластичність досліджували за допомогою сферичного вдавнення. Було встановлено, що середні значення мікротвердості і модуля Юнга збільшуються з підвищенням вмісту водню в сплаві. У той же час, водень перешкоджає виникненню пластичних нестабільностей, одночасно допускаючи локальну однорідну деформацію.

В роботі [2] аморфні зразки були досліджені у вигляді стрижнів діаметром 3 мм і довжиною 50 мм зі сплаву $Zr_{64}Cu_{24}Al_{12}$ і у вигляді пластин $50 \times 10 \times 1$ і $60 \times 30 \times 2$ мм³ зі сплаву $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$. Зразки були одержані литтям під тиском у водоохолоджувальні мідні форми і введенням водню в розплав безпосередньо плавленням майстер сплаву у газовій суміші H_2/Ar . Середній вміст водню в аморфних зразках становив ~2 ат. % ($c_H \sim 0,02$). Температура склування T_g зарядженого воднем і вільного від нього сплаву $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ становила 694 і 687 К відповідно. Одержані в [2] результати вимірювань і динамічного чисельного моделювання механічних властивостей вказують на збільшення міцності, пластичності і в'язкості зразків, легованих воднем, у порівнянні з зразками, які його не містять.

Таким чином, результати експериментальних досліджень вказують на вплив вмісту водню на структуру, термічну стабільність і механічні властивості ОАС на основі цирконію. Фундаментальною основою для пояснення такого впливу, безумовно, є термодинамічні параметри взаємодії компонентів, які враховують взаємодію кожного з металів, що складають сплав, між собою і взаємодію водню, як легуючої добавки, з кожним компонентом сплаву.

В наших попередніх роботах було показано, що інтенсивність взаємодії металів, що складають ОАС на основі цирконію, є високою [3–5]. Про це свідчать дані про перші ентальпії змішування компонентів $\Delta \bar{H}_{Me}^{\infty}$ в рідких сплавах граничних двокомпонентних систем, представлені в таблиці 1. Для сплавів на основі цирконію в першу чергу необхідно підкреслити великі від'ємні значення першої ентальпії змішування міді, нікелю і алюмінію при розчиненні в ньому. Також інтенсивна взаємодія компонентів спостерігається в подвійних системах титану, міді і нікелю з алюмінієм та титану з нікелем. Саме такий характер взаємодії компонентів визначає термодинамічну стабільність ОАС.

Водень демонструє інтенсивну взаємодію з цирконієм і титаном, на що вказують від'ємні значення його першої ентальпії змішування з цими металами. В системах з іншими компонентами для нього характерні додатні значення ентальпії змішування, і така взаємодія не може додавати до термодинамічної стабільності аморфної фази.

Таблиця 1 – Перші ентальпії змішування компонентів в бінарних рідких сплавах, що входять до складу системи Zr–Cu–Al–Ni–Ti–H. Стандартний стан для металів – рідина, для водню – газ при тиску 1 атм

Система	Me	$\Delta\bar{H}_{\text{Me}}^{\infty}$, кДж/моль	Посилання на джерело, що містить відповідну термодинамічну модель
Al–Cu	Al	–102	[6]
	Cu	–52	
Al–Ni	Al	–169	[7]
	Ni	–158	
Al–Ti	Al	–75	[8]
	Ti	–122	
Al–Zr	Al	–131	[9]
	Zr	–157	
Cu–Ni	Cu	14	[3]
	Ni	14	
Cu–Ti	Cu	–48	[3]
	Ti	–20	
Cu–Zr	Cu	–59	[3]
	Zr	–59	
Ni–Ti	Ni	–96	[3]
	Ti	–183	
Ni–Zr	Ni	–105	[3]
	Zr	–209	
Ti–Zr	Ti	–22	[3]
	Zr	–22	
Al–H	H	51	[10]
Cu–H	H	47	[11]
Ni–H	H	18	[12]
Ti–H	H	–45	[13]
Zr–H	H	–52	[14]

Ще одним джерелом термодинамічної стабільності багатокомпонентної аморфної фази є внесок конфігураційної ентропії змішування ΔS_{conf} , яка визначається концентраціями розчинених в ній компонентів. Розчинення в аморфному сплаві водню буде сприяти збільшенню конфігураційної складової і підвищенню термодинамічної стабільності аморфної фази. В таблиці 2 наведені результати розрахунку конфігураційної ентропії аморфного сплаву Vit-105 MG складу $\text{Zr}_{52,5}\text{Cu}_{17,9}\text{Ni}_{14,6}\text{Al}_{10}\text{Ti}_5$ для різних

ступенів його насичення воднем. Результати розрахунків вказують на збільшення функції ΔS_{conf} при підвищенні вмісту водню до $c_H = 0,29$. При цій концентрації збільшення конфігураційної ентропії аморфної фази за рахунок розчинення водню $\Delta S_{\text{conf}}(H)$ становить 2,0 Дж/(моль·К). При подальшому підвищенні вмісту водню значення ΔS_{conf} і $\Delta S_{\text{conf}}(H)$ зменшуються. В таблиці 2 також представлені результати розрахунку внеску розчинення водню в термодинамічну стабільність аморфної фази, а саме внесок $\Delta G_{\text{conf}}(H)$ в конфігураційну складову її енергії Гіббса. Як видно з розрахунків, максимальний внесок $\Delta G_{\text{conf}}(H)$ при умовній температурі аморфізації $T_g = 700$ К спостерігається для сплаву з $c_H = 0,29$ і становить $-1,4$ кДж/моль.

Таблиця 2 – Внески в конфігураційну складову ентропії і енергії Гіббса аморфних сплавів системи $Zr_{52,5}Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}Ti_5-H$, пов'язані з розчиненням водню

c_H	x_H	ΔS_{conf} , Дж/(моль·К)	$\Delta S_{\text{conf}}(H)$, Дж/(моль·К)	$\Delta G_{\text{conf}}(H)$, кДж/моль
0	0	10,9	0	0
0,02	0,020	11,5	0,6	-0,4
0,11	0,099	12,5	1,6	-1,1
0,13	0,115	12,6	1,7	-1,2
0,29	0,225	12,9	2,0	-1,4
0,50	0,333	12,5	1,6	-1,1

Таким чином, розчинення водню в ОАС на основі цирконію і пов'язаний з ним внесок в конфігураційну складову енергії Гіббса та інтенсивна взаємодія водню з основою сплаву може призводити до підвищення термічної стабільності переохолоджених розплавів і відповідних аморфних сплавів. На це вказує зазначене вище збільшення T_g для сплаву $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$, зарядженого воднем. Створення спеціальної термодинамічної бази даних може стати дієвим інструментом для оптимізації складу легованих воднем ОАС з метою проєктування одночасно більш міцних і пластичних аморфних сплавів.

Список використаних джерел

1. Tian L., Tönnies D., Hirsbrunner M., Sievert T., Shan Z., Volkert C.A., Effect of Hydrogen Charging on Pop-in Behavior of a Zr-based Metallic Glass. *Metals*. 2019. Vol. 10. N 1. P. 1–9.
2. Luo L., Wang B., Dong F., e.o. Structural origins for the generation of strength, ductility and toughness in bulk-metallic glasses using hydrogen microalloying. *Acta Mater*. 2019. Vol. 171. P. 216–230.

3. Turchanin M. A., Agraval P. G., Velikanova T. Y., Vodopyanova, A. A. Prediction of glass formation composition ranges for multicomponent melts in the framework of the CALPHAD method. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2018. Vol. 57. N 1–2. P.57–70.
4. Turchanin M., Agraval P., Dreval L., Vodopyanova A. Thermodynamics and Chemical Ordering of Liquid Cu-Hf-Ni-Ti-Zr Alloys. *J. Phase Equilib. Diffusion.* 2021. Vol. 42. N 5. P. 623–646.
5. Turchanin M., Agraval P., Vodopyanova G., Korsun V. Thermodynamic Properties of the Glass-Forming Ternary (Fe, Co, Ni, Cu)–Ti–Zr Liquid Alloys II. Temperature–Concentration Dependence of Thermodynamic Mixing Functions and Chemical Ordering in Liquid Alloys. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2024. Vol. 62. P. 722–736.
6. Liang S.-M., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic assessment of the Al–Cu–Zn system, part II: Al–Cu binary system. *CALPHAD.* 2015. Vol. 51. P. 252–260.
7. Ansara I., Dupin N., Lukas H. L., Sundman B. Thermodynamic assessment of the Al–Ni system. *J. Alloys Compd.* 1997. Vol. 247. N 1-2. P. 20–30.
8. Witusiewicz V.T., Bondar A., Hecht U., Rex S., Velikanova T.Y. The Al–B–Nb–Ti system: III. Thermodynamic re-evaluation of the constituent binary system Al–Ti. *J. Alloys Compd.* 2008. Vol. 465. N 1-2. P. 64–77.
9. Fischer E., Colinet C. An updated thermodynamic modeling of the Al–Zr system. *J. Phase Equilib. Diffusion.* 2015. Vol. 36. P. 404–413.
10. Palumbo M., Torres F., Ares J., Pisani C., Fernandez J., Baricco M., Thermodynamic and ab initio investigation of the Al–H–Mg system. *CALPHAD.* 2007. Vol. 31. N. 4. P. 457–467.
11. Huang W., Opalka S.M., Wang D., Flanagan T. B. Thermodynamic modelling of the Cu–Pd–H system. *CALPHAD.* 2007. Vol. 31. N 3. P. 315–329.
12. Bourgeois N., Crivello J.-C., Saengdeejing A., Chen Y., Cenedese P., Joubert J.-M. Thermodynamic modeling of the Ni–H system. *J. Phys. Chem. C.* 2015. Vol. 119. N 43. P. 24546–24557.
13. San-Martin A., Manchester F. The H–Ti (hydrogen–titanium) system. *Bull. Alloy Phase Diagrams.* 1987. Vol. 8. N 1. P. 30–42.
14. Zuzek E., Abriata J., San-Martin A., Manchester F. The H–Zr (hydrogen–zirconium) system. *Bull. Alloy Phase Diagrams.* 1990. Vol. 11. N 4. P. 385–395.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному
та мережному режимах

**НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ І ГАЗИ
У ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ**

Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції
(Запоріжжя, 26-27 листопада 2024 року)

**присвячена 125-річчю Національного університету
«Запорізька політехніка»**

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. № 78

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.