

ISSN 0430-6252

ФІЗИКО-
ХІМІЧНА
МЕХАНІКА
МАТЕРІАЛІВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ
PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

3-2020

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

З. Т. НАЗАРЧУК (головний редактор), Г. М. НИКИФОРЧИН (заст. головного редактора), Р. Р. КОКОТ (відповідальний секретар), О. Є. АНДРЕЙКІВ, Р. Є. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ, І. М. ДМИТРАХ, З. А. ДУРЯГІНА, І. Ю. ЗАВАЛІЙ, О. І. ЗВІРКО, І. М. ЗІНЬ, Р. М. КУШНІР, Д. Б. КУРИЛЯК, О. П. ОСТАШ, В. В. ПАНАСЮК, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. С. ХОМА, В. Ф. ЧЕКУРИН, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, В. М. ФЕДІРКО, С. О. ФІРСТОВ, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, П. В. ЯСНІЙ

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), Т. ЛАГОДА (Польща), Г. ЛЕСЮК (Польща), П. МОРЕЙРА (Португалія), А. ПІХ (Німеччина), Г. ПЛЮВІНАЖ (Франція), Я. ПОКЛЮДА (Чехія), Г. ШМІТТ (Німеччина), А. СЕДМАК (Сербія), Х. ТОРІБІО (Іспанія), Л. ТОТ (Угорщина), П. ТРАМПУШ (Угорщина), В. ЯРТИСЬ (Норвегія)

EDITORIAL BOARD

Z. T. NAZARCHUK (Editor-in-Chief), H. M. NYKYFORCHYN (Deputy Editor-in-Chief), R. R. KOKOT (Secretary), O. Ye. ANDREIKIV, R. Ye. GLADYSHEVSKII, I. M. DMYTRAKH, Z. A. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKIY, O. Z. STUDENT, M. S. KHOMA, V. F. CHEKURIN, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK, P. V. YASNIY

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), G. BOLZON (Italy), M. ELBOUJDAINI (USA–Canada), E. GDOUTOS (Greece), V. KAIN (India), T. LAGODA (Poland), G. LESIUK (Poland), P. MOREIRA (Portugal), A. PICH (Germany), G. PLUVINAGE (France), J. POKLUDA (Czech Republic), G. SCHMITT (Germany), A. SEDMAK (Serbia), J. TORIBIO (Spain), L. TÓHT (Hungary), P. TRAMPUSH (Hungary), V. YARTYS' (Norway)

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. Г. М. Никифорчин
Responsible for issue Dr. (Engn.), Prof. H. M. Nykyforchyn

Адреса редакції: 79601, Львів МСП, Наукова, 5, Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України. Тел.: (032) 263-73-74,
(032) 229-62-30. Факс: (032) 264-94-27.
E-mail: journal.pcm@gmail.com

WWW-address: <http://pcmm.ipm.lviv.ua>

Editorial office address: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St.,
Lviv 79601, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.
E-mail: journal.pcm@gmail.com

Відповідальний секретар редакції **Р. Р. Кокот**

Редактори *Д. С. Бриняк, О. Т. Досин, Л. Є. Слейко*

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

Зав. групою комп'ютерної підготовки видання *І. В. Калинюк*

Комп'ютерний набір *Л. Г. Копчак, Г. М. Кулик*

Підписано до друку 26.06.2020. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 010720 від 01.07.2020. Ціна договірна.
Реєстраційне свідоцтво серія КВ № 203 від 10.11.93

Друкарня ТзОВ "Простір-М", 79000, Львів, вул. Чайковського, 8

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,
"ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ", 2020

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

Міжнародний науково-технічний журнал
Заснований у січні 1965 року
Виходить 6 разів у рік

ТОМ 56, № 3, 2020

травень – червень

ЗМІСТ

<i>Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Райтер О. К.</i> Розрахункова модель для оцінювання довговічності фібробетонних конструкцій за довготривалого статичного навантаження.....	7
<i>Кравець В. С., Саврук М. П.</i> Деформування ізотропної пластини з періодичною системою криволінійних отворів та смуг пластичності	15
<i>Козачок О. П.</i> Вплив часткового заповнення просвітів стисливою рідиною на контакт пружних тіл із хвилястим рельєфом	24
<i>Масюк А. С., Кисіль Х. В., Катрук Д. С., Скорохода В. Й., Білий Л. М., Гуменецький Т. В.</i> Пружно-пластичні властивості полілактидних композитів з дрібнодисперсними наповнювачами	31
<i>Jinfei Wang, Кунь П. С., Ленковський Т. М., Вікович І. А., Бойко В. М.</i> Оцінювання втомної міцності пластинчастого тягового ланцюга	39
<i>Миндюк В. Д., Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Карнаш О. М.</i> Зв'язок між параметрами акустичних структурних шумів та механічними властивостями конструкційних сталей	44
<i>Шейкін С. Є., Андреев І. В., Мельниченко В. В., Студенець С. Ф., Мельниченко Я. В., Гнатенко І. О.</i> Деформаційне зміцнення сплаву системи W–Ni–Fe холодним багатоцикловим редукуванням.....	51
<i>Скобло Т. С., Сідашенко О. І., Сайчук О. В., Клочко О. Ю., Левкін Д. А.</i> Вплив напружень на структурні зміни в сірому чавуні	57
<i>Ghazvinloo H. R., Honarbakhsh-Raouf A.</i> Пластичність зварного з'єднання вуглецевої сталі SK45	66
<i>Максимів О. В., Кирилів В. І., Чайковський Б. П., Кирилів Я. Б., Гордійчук Л. М., Ярошович І. Г.</i> Вплив поверхневого наноструктурування на роботоздатність чавунних валків СШХН	70
<i>Стечишин М. С., Олександренко В. П., Мартинюк А. В., Лук'янюк М. М., Довжик М. Я., Герасименко В. О.</i> Фізико-хімічні властивості карбоазотованої сталі 40X	76
<i>Мисливченко О. М., Крапівка М. О., Терещенко О. С., Філеп М. Й.</i> Вплив хрому на фазовий склад і особливості зміцнення високоентропійного сплаву MnFeCoNiCu.....	81

<i>Лузан С. О., Лузан А. С.</i> Мікроструктура та опір абразивному зношуванню наплавленого матеріалу системи Ni–Cr–B–Si із включеннями дисперсних фаз	86
<i>Завалій І. Ю., Лютий П. Я., Ощиповський І. В., Ковальчук І. В., Березовець В. В.</i> Нові субнітриди Zr_3MN_x ($M - Co, Ni$): теоретичні розрахунки, кристалічна структура та воденьсорбційні властивості.....	93
<i>Марущак П. О., Литвиненко Я. В., Дзюра В. О., Біщак Р. Т., Полутренко М. С.</i> Виявлення мікродефектів на поверхні кородованої сталеві труби.....	103
<i>Немчук О. О., Звірко О. І.</i> Електрохімічний метод діагностування деградації сталей морських порталних кранів	112
<i>Ниркова Л. І., Осадчук С. О., Клименко А. В., Рибаків А. О., Мельничук С. Л., Прокопчук С. М.</i> Вплив корозивності середовища на відношення струму катодного захисту до граничного дифузійного для трубної сталі X70.....	119
<i>Лещак Р. Л., Бабій А. В., Барна Р. А., Сиротюк А. М.</i> Корозійна тривкість сталі рами штангових обприскувачів.....	126
<i>Квасницька Ю. Г., Іваськевич Л. М., Балицький О. І., Максютя І. І., Мьяльніца Г. П.</i> Високотемпературна сольова корозія нікелевого жароміцного сплаву.....	133

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г. В. КАРПЕНКО

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Международный научно-технический журнал

Основан в январе 1965 года

Выходит 6 раз в год

ТОМ 56, № 3, 2020

май – июнь

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Андрейкив А. Е., Долинская И. Я., Райтер О. К.</i> Расчетная модель для оценивания долговечности фибробетонных конструкций при длительном статическом нагружении	7
<i>Кравец В. С., Саврук М. П.</i> Деформирование изотропной пластины с периодической системой криволинейных отверстий и полос пластичности	15
<i>Козачок О. П.</i> Влияние частичного заполнения зазоров сжимаемой жидкостью на контакт упругих тел с волнистым рельефом	24
<i>Масюк А. С., Кысиль Х. В., Катрук Д. С., Скорохода В. И., Билый Л. М., Гуменецкий Т. В.</i> Упругопластические свойства полилактидных композитов с мелкодисперсными наполнителями	31
<i>Jinfei Wang, Кунь П. С., Ленковский Т. М., Викович И. А., Бойко В. Н.</i> Оценивание усталостной прочности пластинчатой тяговой цепи	39
<i>Мындюк В. Д., Чабан Н. И., Рыбицкий И. В., Карпаш О. М.</i> Связь между параметрами акустических структурных шумов и механическими свойствами конструкционных сталей	44
<i>Шейкин С. Е., Андреев И. В., Мельниченко В. В., Студенец С. Ф., Мельниченко Я. В., Гнатенко И. А.</i> Деформационное упрочнение сплава системы W–Ni–Fe холодным многоциклическим редуцированием	51
<i>Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Сайчук А. В., Клочко О. Ю., Левкин Д. А.</i> Влияние напряжений на структурные изменения в сером чугуна	57
<i>Ghazvinloo H. R., Honarbakhsh-Raouf A.</i> Пластичность сварного соединения углеродистой стали СК45	66
<i>Максымов О. В., Кырылив В. И., Чайковский Б. П., Кырылив Я. Б., Гордийчук Л. Н., Ярошович И. Г.</i> Влияние поверхностного наноструктурирования на работоспособность чугунных валков СШХН	70
<i>Стечишин М. С., Олександренко В. П., Мартынюк А. В., Лукьянюк Н. Н., Довжик М. Я., Герасименко В. А.</i> Физико-химические свойства углекислотированной стали 40Х	76
<i>Мысльвченко А. Н., Крапивка Н. А., Терещенко А. С., Филеп М. И.</i> Влияние хрома на фазовый состав и особенности упрочнения высокоэнтропийного сплава MnFeCoNiCu	81

<i>Лузан С. О., Лузан А. С.</i> Микроструктура и сопротивление абразивному износу наплавленного материала системы Ni–Cr–B–Si с включениями дисперсных фаз	86
<i>Завалий И. Ю., Лютый П. Я., Ощановский И. В., Ковальчук И. В., Березовец В. В.</i> Новые субнитриды Zr_3MN_x (M – Co, Ni): теоретические расчеты, кристаллическая структура и водородосорбционные свойства	93
<i>Марущак П. О., Литвиненко Я. В., Дзюра В. А., Бищак Р. Т., Полутренко М. С.</i> Выявление микродефектов на поверхности корродированной стальной трубы	103
<i>Немчук А. О., Звирко О. И.</i> Электрохимический метод диагностирования деградации сталей морских порталных кранов.....	112
<i>Ныркова Л. И., Осадчук С. А., Клименко А. В., Рыбаков А. А., Мельничук С. Л., Прокопчук С. Н.</i> Влияние коррозионной активности среды на отношение тока катодной защиты к предельному диффузионному для трубной стали X70	119
<i>Лещак Р. Л., Бабий А. В., Барна Р. А., Сыротюк А. М.</i> Коррозионная стойкость стали рамы штанговых опрыскивателей.....	126
<i>Кваснищкая Ю. Г., Іваськевич Л. М., Балицкий А. И., Максютта И. И., Мьяльница Г. Ф.</i> Высокотемпературная солевая коррозия никелевого жаропрочного сплава	133

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

PHYSICO-CHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal
Founded in January 1965
Published bimonthly

VOLUME 56, № 3, 2020

May – June

CONTENTS

<i>Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., and Raiter O. K.</i> Calculation model for assessment of fibroconcrete structures lifetime under long-term static loading	7
<i>Kravets V. S., and Savruk M. P.</i> Deformation of an isotropic plate with a periodic system of curvilinear holes and plasticity bands	15
<i>Kozachok O. P.</i> The influence of partial filling of gaps by compression liquid on the contact of elastic bodies with a wavy relief	24
<i>Masiuk A. S., Kysil Kh. V., Katruk D. S., Skorokhoda V. Yo., Bilyy L. M., and Humenetskyi T. V.</i> Elasto-plastic properties of polylactide composites with highly dispersed fillers.....	31
<i>Jinfei Wang, Kun P. S., Lenkovskiy T. M., Vikovych I. A., and Boiko V. M.</i> Assessing fatigue strength of a plate traction chain.....	39
<i>Myndiuk V. D., Chaban N. I., Rybitskyi I. V., and Karpash O. M.</i> Relation between parameters of acoustic structural noises and mechanical properties of structural	44
<i>Sheikin S. Ye., Andreiev I. V., Melnychenko V. V., Studenets S. F., Melnychenko Ya. V., and Hnatenko I. O.</i> Deformation hardening of W–Ni–Fe alloy by cold multi-cycle reduction	51
<i>Skoblo T. S., Sidashenko O. I., Saychuk O. V., Klochko O. Y., and Levkin D. A.</i> The influence of stresses on structural changes in grey cast-iron	57
<i>Ghazvinloo H. R. and Honarbakhsh-Raouf A.</i> Ductility of welding joints in CK45 carbon steel	66
<i>Maksymiv O. V., Kyrlyiv V. I., Chaikovskiy B. P., Kyrlyiv Ya. B., Hordiichuk L. M., and Yaroshovych I. H.</i> The influence of surface nanostructurization on seviceability of cast-iron of CIIXH rollers	70
<i>Stechyshyn M. S., Oleksandrenko V. P., Martyniuk A. V., Lukianiuk M. M., Dovzhyk M. Ya., and Gerasimenko V. A.</i> Physicochemical properties of 40X carbonitrided steel.....	76
<i>Myslyvchenko O. M., Krapivka M. O., Tereshchenko O. S., and Filep M. Yo.</i> The influence of chromium on the phase composition and peculiarities of strengthening of high-entropy MnFeCoNiCu alloy.....	81
<i>Luzan S. O. and Luzan A. S.</i> Microstructure and abrasive wear resistance of the deposited Ni–Cr–B–Si material with dispersive phases inclusions	86

<i>Zavaliy I. Yu., Liutyi P. Ya., Oshchapovskyi I. V., Kovalchuk I. V., and Berezovets V. V.</i> New subnitrides Zr_3MN_x ($M - Co, Ni$): theoretical calculations, crystal structure and hydrogen sorption properties	93
<i>Marushchak P. O., Lytvynenko Ya. V., Dziura V. O., Bishchak R. T., and Polutrenko M. S.</i> Detection of microdefects on the surface of corroded steel pipe.....	103
<i>Nemchuk O. O. and Zvirko O. I.</i> Electrochemical method of diagnostics of sea portal cranes degradation.....	112
<i>Nyrkova L. I., Osadchuk S. O., Klymenko A. V., Rybakov A. O., Melnychuk S. L., and Prokopchuk S. M.</i> The influence of corrosive environment on the correlation of cathode protection current and limit diffusion current for the X70 pipe steel	119
<i>Leshchak R. L., Babii A. V., Barna R. A., and Syrotyuk A. M.</i> Corrosion resistance of steel for boom sprayers frame.....	126
<i>Kvasnytska Yu. H., Ivaskevych L. M., Balitskii O. I., Maksyiuta I. I., and Mialnitsa G. P.</i> High-temperature salt corrosion of nickel heat-resistant alloy	133

ВПЛИВ ХРОМУ НА ФАЗОВИЙ СКЛАД І ОСОБЛИВОСТІ ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ MnFeCoNiCu

О. М. МИСЛИВЧЕНКО¹, М. О. КРАПІВКА¹, О. С. ТЕРЕЩЕНКО²,
М. Й. ФІЛЕП³

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

² ТОВ "МАТЕРІАЛЗ ЛАБ", Київ;

³ НДІ Фізики та хімії твердого тіла ДВНЗ "УжНУ", Ужгород

Шестикомпонентна система високоентропійних сплавів MnFeCoNiCuCr_x з різним вмістом хрому (де $x = 0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0$ mol) отримана методом аргоно-дугової плавки в печі МІФІ-9. З допомогою рентгеноструктурного аналізу, растрової електронної мікроскопії та ідентування досліджено вплив хрому на кристалічну структуру, мікроструктуру і твердість цих сплавів у литому стані. Залежно від вмісту хрому в їх структурі виявлено суміш таких фазових складників: два гранецентрованих куби + об'ємноцентрований куб + інтерметалічна σ -фаза (ГЦК1+ ГЦК2+ОЦК+ σ). Встановлено, що зі збільшенням вмісту хрому утворюється структура ОЦК та σ -фаза, що є домінуючим чинником зміцнення сплаву.

Ключові слова: високоентропійні сплави, фазовий склад, твердість.

Вступ. Більшість сплавів, які сьогодні використовують у промисловості, розроблені на основі одного головного елемента металу – Fe, Al, Cu, Ti тощо. Створено [1] новий клас сплавів, названих високоентропійними через високу, проти традиційних, ентропію змішування у рідкому стані. За визначенням ВЕС повинен мати щонайменше п'ять елементів з концентрацією кожного від 5 до 35 at.%. За належного складу ці сплави можуть володіти високими твердістю, зносостійкістю, стійкістю до окиснення і корозії [2, 3].

В останнє десятиліття отримали і дослідили ВЕСи різного складу. Серед них варто виділити однофазний ГЦК сплав MnFeCoNiCu, який вже достатньо вивчений і має високу міцність і термостабільні механічні властивості [4, 5]. Мета цього дослідження – визначити вплив хрому на структуру, фазовий склад та твердість ВЕСу MnFeCoNiCu. Цей вибір обумовлений тим, що хром є відносно дешевим елементом-металом, який використовують для легування сталей і який з декількома елементами сплаву, згідно з подвійними діаграмами стану, може утворювати σ -фазу.

Методика. Сплави отримували в аргоно-дуговій печі МІФІ-9 в атмосфері високочистого аргону. Виплавляли невитратним вольфрамовим електродом на мідній водоохолоджувальній подині. Отримані виливки переплавляли 6–7 разів, щоб гомогенізувати склад та охолоджували зі швидкістю ~80...100 K/s. Вихідний сплав MnFeCoNiCu містив по 20 at.% кожного елемента.

Фазовий склад визначали методом рентгенівської дифракції у фокусувальній геометрії Брега–Брентано на дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматичному $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. Мікроструктуру полірованих нетравлених мікрошліфів вивчали на сканівному електронному мікроскопі TESCAN VEGA3, оснащеному детектором для реєстрації відбитих електронів. Мікротвердість за Віккерсом (HV)

вимірювали на полірованих поверхнях, використовуючи алмазну піраміду Віккерса 136° за навантаження 250 г упродовж 15 с.

Результати та їх обговорення. Дифрактограми литих сплавів MnFeCoNiCuCr_x подано на рис. 1. Вихідний сплав MnFeCoNiCu містив лише одну ГЦК-фазу з періодом ґратки $a = 3,6322$ (рис. 1a). Після додавання 0,5 mol хрому в ньому утворюються дві фази – ГЦК1 та ГЦК2 з періодом ґратки $a = 3,6021$ і $3,6632$ відповідно (рис. 1b). Згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу домінує ГЦК1-фаза, вміст якої становить 72 mass%. На дифрактограмі еквіатомного сплаву зафіксували ті ж самі фази, що і в сплаві $\text{MnFeCoNiCuCr}_{0,5}$. Співвідношення між ними не змінилося, проте періоди їх ґраток $a_{\text{ГЦК1}} = 3,6087$ та $a_{\text{ГЦК2}} = 3,6744$.

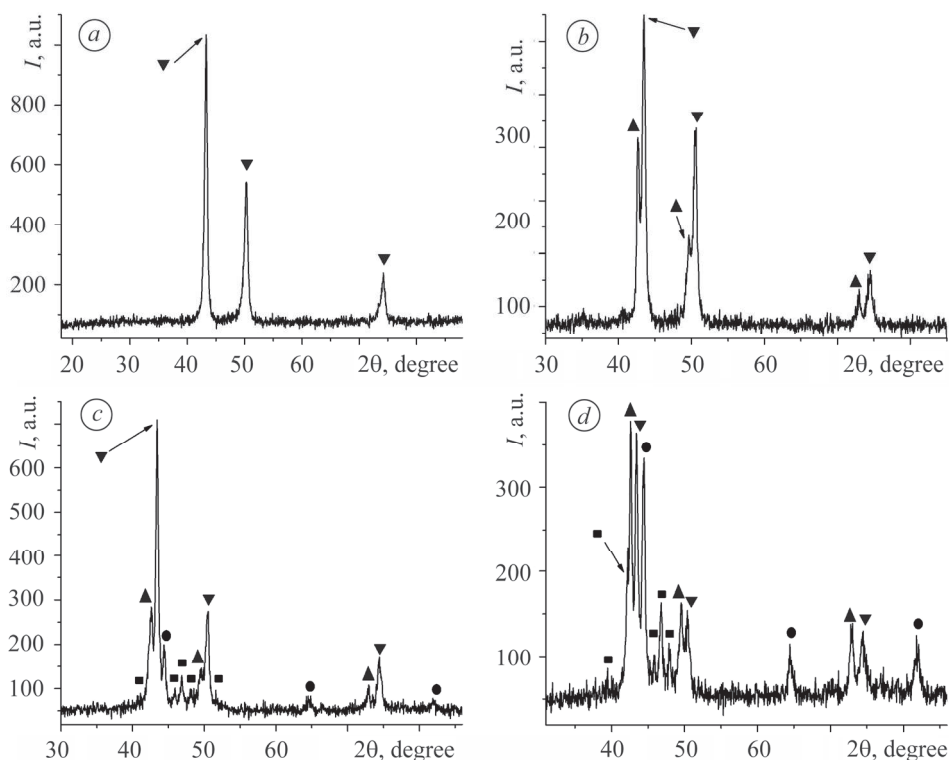


Рис. 1. Дифрактограми сплавів системи MnFeCoNiCuCr_x , залежно від вмісту хрому: $a - x = 0$, ∇ – ГЦК; $b - 0,5$ mol, ∇ – ГЦК1, \blacktriangle – ГЦК2; $c - 2,0$, \bullet – ОЦК, ∇ – ГЦК1, \blacktriangle – ГЦК2, \blacksquare – σ -фаза (типу FeCr); $d - 3,0$ mol, \bullet – ОЦК, ∇ – ГЦК1, \blacktriangle – ГЦК2, \blacksquare – σ -фаза (типу FeCr). Стрілки вказують на дифракційний максимум.

Fig. 1. Diffraction patterns of alloys of the MnFeCoNiCuCr_x system depending on the chromium content: $a - x = 0$, ∇ – FCC; $b - 0.5$ mol, ∇ – FCC1, \blacktriangle – FCC2; $c - 2.0$, \bullet – BCC, ∇ – FCC1, \blacktriangle – FCC2, \blacksquare – σ -phase (type FeCr); $d - 3.0$ mol, \bullet – BCC, ∇ – FCC1, \blacktriangle – FCC2, \blacksquare – σ -phase (type FeCr). Arrows indicate the diffraction maximum.

З подальшим збільшенням вмісту хрому суттєво змінюється фазовий склад сплавів (табл. 1). Зокрема, в литому сплаві MnFeCoNiCuCr_2 рентгенографічно зафіксували три тверді розчини (ГЦК1, ГЦК2, ОЦК) та σ -фазу типу FeCr (рис. 1c). Зразок додатково досліджували, використовуючи електронну мікроскопію (рис. 2a). Оскільки σ - та ОЦК-фази мають близький хімічний склад та високу твердість [6], то проявлятимуться темними ділянками (без подряпини від полірування). За цієї концентрації хрому середній атомний номер фаз близький, тому на зображенні мікроструктури їх колір подібний, але ділянка з σ -фазою, що збагачена

хромом, тут найтемніша. Світла та сіра ділянки асоціюються з ГЦК1- та ГЦК2-фазами. Також варто відмітити, що по всій темній ділянці виявили мікрровключення світлої фази (ГЦК2, що, ймовірно, збагачена міддю) з середнім розміром $\sim 0,25 \mu\text{m}$.

Таблиця 1. Вміст фаз у сплавах MnFeCoNiCuCr_2 та MnFeCoNiCuCr_3

Сплав	Вміст фаз, mass%			
	ГЦК1	ГЦК2	ОЦК	σ -фаза
MnFeCoNiCuCr_2	56,0	20,0	7,0	17
MnFeCoNiCuCr_3	23,0	29,0	19	29

Таблиця 2. Електронна концентрація та ентропія змішування сплавів MnFeCoNiCuCr_x [7]

Вміст хрому в сплавах, mol	0	0,5	1,0	2,0	3,0
Електронна концентрація, el./at.	9,0	8,7	8,5	8,1	7,9
Ентропія змішування, J/(mol·K)	13,30	14,60	14,90	14,53	13,85

За подальшого збільшення вмісту хрому до 3 mol згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу змінюється лише вміст цих фаз (табл. 2). Результати електронної мікроскопії добре узгоджуються з даними рентгеноструктурного аналізу. За концентрації хрому 3 mol у мікроструктурі чітко зафіксували чотири фази. Вважаємо, що першими кристалізуються дендрити ОЦК-фази (темно-сірий колір), по контуру яких знаходяться чорні плями σ -фази, далі – дендрити ГЦК1 фази (світло-сірий колір), а міждендритний об'єм заповнює ГЦК2-фаза (світлий колір). Включень світлої фази (ГЦК2) у тілі дендриту (ОЦК) не виявили. Подряпин від полірування на ОЦК- та σ -фазах відсутні.

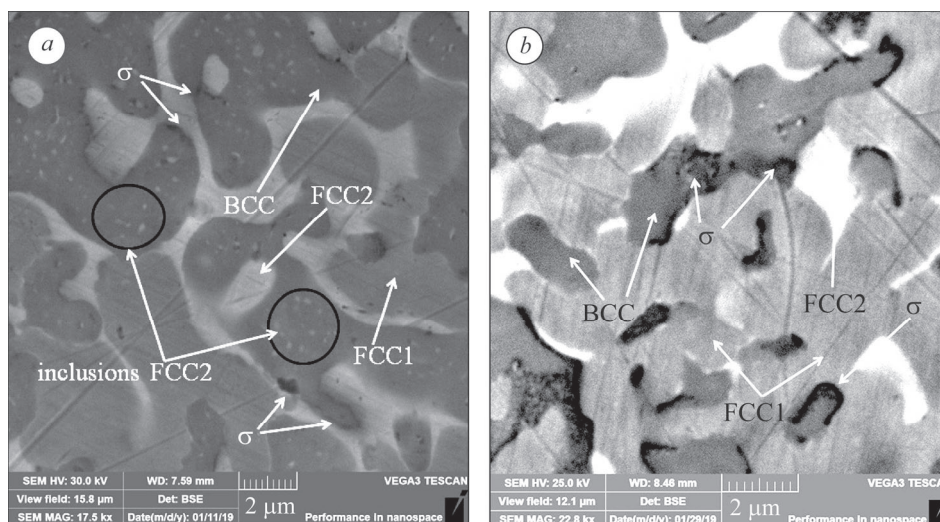


Рис. 2. Мікроструктури литих сплавів системи MnFeCoNiCuCr_x у відбитих електронах залежно від вмісту хрому: $a - x = 2,0$; $b - 3,0$.

Fig. 2. Microstructures of as-cast MnFeCoNiCuCr_x alloys in back scattering electron, depending on the chromium content: $a - x = 2,0$; $b - 3,0$.

Така радикальна зміна фазового складу і структури залежить від концентрації хрому в сплавах MnFeCoNiCuCr_x пов'язана з тим, що його атоми в розплаві виконують три основні функції: змінюють електронну концентрацію розплаву

(табл. 2), а отже, і фазовий склад [7]; викликають ліквідацію міді, оскільки ця пара елементів (Cr–Cu) має одну з найвищих ентальпій змішування (табл. 3) [8]; сприяють формуванню σ -фази (Cr–Fe, Cr–Co тощо), причому за високих концентрацій хрому термодинамічно вигідніше утворення σ -фази, ніж ОЦК твердого розчину.

Таблиця 3. Ентальпія змішування атомних пар, які використовували під час виготовлення ВЕСів, kJ/mol [8]

Елемент	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Mn
Cr	0	-1	-4	-7	+12	2
Fe		0	-1	-2	+13	0
Co			0	0	+6	-5
Ni				0	+4	-8
Cu					0	4
Mn						0

У сплаві MnFeCoNiCu з електронною концентрацією 9 el./at. формується ГЦК-фаза (область стійкості якої перевищує 8,2 el./at. [6]). Для сплаву MnFeCoNiCuCr_{0,5} електронна концентрація змінюється несуттєво (8,7 el./at.), але з появою в ґратці атомів хрому через їх сусідство з атомами міді з позитивною ентальпією змішування збільшується енергія Гібса, тому під час кристалізації високоентропійної фази ГЦК1 відбувається ліквідація міді і утворюється окрема ГЦК2-фаза.

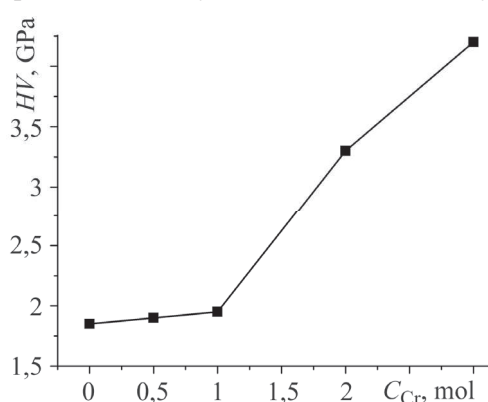


Рис. 3. Концентраційна залежність твердості за Вікерсом для сплавів системи MnFeCoNiCuCr_x.

Fig. 3. Concentration dependence of Vickers hardness for MnFeCoNiCuCr_x alloys.

Для еквіатомного складу MnFeCoNiCuCr вказані вище тенденції зберігаються, оскільки електронна концентрація 8,5 el./at. ще сприяє стабілізації ГЦК, а ентропія сплаву максимальна (табл. 2). У сплаві MnFeCoNiCuCr₂ середня електронна концентрація становить 8,1 el./at., а це вже область сумісної кристалізації ОЦК- і ГЦК-фаз [6]. Тому першою кристалізується ОЦК-фаза у вигляді сірих дендритів, на поверхні яких через часткову ліквідацію хрому виділяється σ -фаза, а решта розплаву кристалізується з утворенням ГЦК1- і ГЦК2-фаз. З подальшим збільшенням концентрації хрому фазовий склад вже не змінюється, а лише співвідношення фаз (див. табл. 1). Велика ж кількість фаз обумовлена різким

зменшенням ентропії розплаву (табл. 2).

Виявили (рис. 3), що на початковому етапі зростання вмісту хрому в системі поступово підвищується рівень твердорозчинного зміцнення і плавно зростає твердість (ділянка від 0 до 1,0 mol хрому), яка далі внаслідок виділення ОЦК- та σ -фаз різко підвищується.

ВИСНОВКИ

У сплавах системи MnFeCoNiCuCr_x зі збільшенням концентрації хрому склад змінюється від одно- (ГЦК) до чотирифазного (ГЦК1, ГЦК2, ОЦК, σ). Утворення ОЦК- та σ -фаз зафіксували за концентрації хрому вище еквіатомної. По контуру

ОЦК-фази виділяється σ -фаза. Для сплаву MnFeCoNiCuCr_2 характерні дрібно-дисперсні включення міждендритної області (ГЦК2) у тілі дендриту (ОЦК). ОЦК-та σ -фази мають суттєво більшу твердість, ніж ГЦК1 та ГЦК2, і призводять до різкого зростання твердості сплавів.

РЕЗЮМЕ. Шестикомпонентная система высокоэнтропийных сплавов MnFeCoNiCuCr_x с различным содержанием хрома (где $x = 0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0$ mol) получена методом аргоно-дуговой плавки в печи МИФИ-9. С помощью рентгеноструктурного анализа, растровой электронной микроскопии и индентирования исследовано влияние хрома на кристаллическую структуру, микроструктуру и твердость этих сплавов в литом состоянии. В зависимости от содержания хрома в их структуре выявлена смесь следующих фазовых составляющих: два гранецентрированной куба + объемноцентрированный куб + интерметаллическая σ -фаза (ГЦК1 + ГЦК2 + ОЦК + σ). Увеличение содержания хрома приводит к образованию ОЦК- и σ -фаз, что является доминирующим фактором упрочнения сплава.

Ключевые слова: *высокоэнтропийные сплавы, фазовый состав, твердость.*

SUMMARY. The six-component system of high-entropy MnFeCoNiCuCr_x alloys with different chromium content (where $x = 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ mol) was obtained by the method of argon-arc melting in the MIFI-9 furnace. Using the X-ray analysis, scanning electron microscopy and indentation, the effect of chromium on the crystal structure, microstructure and hardness of these alloys in the cast state was investigated. Depending on the chromium content, the MnFeCoNiCuCr_x alloys have a mixture of the following phase components in their structure: two face-centered cubes + body-centered cubes + intermetallic σ -phase (FCC1 + FCC2 + BCC + σ). An increase in the chromium content leads to the formation of a BCC structure and σ -phases, which is the dominant factor in the alloy strengthening.

Keywords: *high-entropy alloys, phase composition, hardness.*

1. *Nanostructured* high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J. W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, and S.-Y. Chang // *Adv. Eng. Mat.* – 2004. – **6**, № 5. – P. 299–303.
2. *Microstructure* and properties of AlCrFeCoNiCu_x high-entropy alloys / M. V. Demchenko, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko, B. Antoszewski, and M. M. Bychenko // *J. of Eng. Sci.* – 2018. – **5**, № 1. – P. 11–16.
3. *Refractory* high-entropy alloys / O. N. Senkov, G. B. Wilks, D. B. Miracle, C. P. Chuang, and P.K. Liaw // *Intermetallics.* – 2010. – **18**, № 9. – P. 1758–1765.
4. *Biswas T. K. and Gurao N.P.* Deciphering micro-mechanisms of plastic deformation in a novel single phase fcc-based MnFeCoNiCu high entropy alloy using crystallographic texture // *Mat. Sci. and Eng.: A.* – 2016. – **657**. – P. 224–233.
5. *Thermal* expansion, elastic and magnetic properties of FeCoNiCu -based high-entropy alloys using first-principle theory / S. Huang, A. Vida, A. Heczal, E. Holmström // *JOM.* – 2017. – **69**, № 11. – P. 2107–2112.
6. *Горбань В. Ф., Крапивка Н. А., Фирстов С. А.* Высокоэнтропийные сплавы, электронная концентрация, фазовый состав, параметр решетки, свойства // *Физика металлов и металловедение.* – 2017. – **118**, № 10. – С. 1017–1029.
7. *Ren M., Li B., and Fu H.* Formation condition of solid solution type high-entropy alloy // *Transact. of Nonferrous Metals Soc. of China.* – 2013. – **23**, № 4. – P. 991–995.
8. *Takeuchi A. and Inoue A.* Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element // *Mat. Transact.* – 2005. – № 12. – P. 2817–2829.

Одержано 06.08.2019