

УДК 621.762.2

О. П. Василега, М. І. Гречанюк, В. Г. Затовський, Р. В. Мінакова

СУЧАСНІ МЕТОДИ ОДЕРЖАННЯ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТА ПОРОШКІВ НА Co ОСНОВІ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ (Огляд)

Наведено дані про сучасні методи одержання сплавів та порошків на основі кобальту. Розглянуто промислові методи виробництва порошкових сплавів, їх переваги та недоліки.

***Ключові слова:** сплав типу Me–Cr–Al–Y, технологія отримання сплавів та порошків із них, переваги, недоліки, перспективи.*

Сучасний рівень розвитку науки та техніки обумовлює необхідність оптимізації властивостей вже існуючих і створення нових матеріалів, що працюють при підвищених температурах. Рівень теплостійкості цих матеріалів зростає за умов використання їх з покриттям типу Me–Cr–Al–Y (де Me — Co, Ni, Fe). На сьогоднішній день застосовуються традиційні покриття, які еволюціонували за структурою від зовнішніх одношарових металічних [1], металокерамічних двошарових [2], градієнтних [3], до зигзагоподібних покриттів [4]. Нижче розглядатимуться методи одержання сплавів та порошків типу Me–Cr–Al–Y.

Методи отримання сплавів типу Me–Cr–Al–Y

Технологія отримання сплавів типу Me–Cr–Al–Y має задовольняти таким вимогам: шихтові матеріали повинні бути достатньо якісними і підготовленими до плавки; розплав має бути захищеним від зовнішнього середовища, оскільки алюмінію, ітрію та хрому притаманна висока спорідненість до кисню; вони здатні повністю або частково переходити в сплав у вигляді ендогенних неметалевих включень; розплав не повинен контактувати із матеріалами, що можуть сприяти утворенню неметалевих включень; з метою забезпечення рівномірності розподілу компонентів в об'ємі зливку розплав необхідно постійно перемішувати; технологія має мінімізувати вигар компонентів сплаву; технологія повинна забезпечувати відповідний економічний ефект.

Цим вимогам в певній мірі відповідають такі технології: електрошлаковий переплав, вакуумно-дуговий переплав, плазово-дуговий переплав, вакуумно-індукційний переплав та електронно-променевий переплав. Кожен із розглянутих методів має певні недоліки та переваги.

Електрошлаковий переплав є достатньо економічним методом, проте у нього є значний недолік, зумовлений тим, що розплав захищений тільки шаром шлаку, а додавання легуючих елементів Al та Y буде розкиснювати не тільки розплав, але й шлакову ванну. Також шлак слугує джерелом

© Гречанюк Микола Іванович, Затовський Віктор Григорович, Мінакова Рімма Валентинівна наукові співробітники Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Василега Ольга Петрівна, аспірант цього ж інституту.

забруднення сплаву неметалевими включеннями та газами. Тож для захисту сплаву доцільно застосовувати середовище вакууму або інертного газу [5].

Вакуумно-дуговий переплав є порівняно недорогим з економічної точки зору. Але даний метод припускає використання витратного електроду та “глухого” кристалізатора. При цьому виникає потреба у застосуванні витратного електроду такого ж хімічного складу, як і сплав даного типу. Проведення процесу невитратним електродом чи застосування порційної подачі компонентів є неможливим у зв'язку з використанням глухого кристалізатора. Виплавка в такий кристалізатор до того ж може призвести до неоднорідності за хімічним складом по висоті зливка.

Плазмово-дуговий переплав має певні особливості, а саме: джерелом нагріву є плазмовий факел, що горить у камері при зниженому тиску в середовищі плазмоутворюючого газу (ним може бути: водень, азот, аргон, гелій та їх суміші) [6]. Для сплавів згаданого типу доцільно використовувати в якості інертних газів аргон або гелій. Щодо гелію, то за його допомогою можна отримувати високоентальпійну плазму за рахунок підвищеної питомої теплоємності, але гелій застосовується обмежено у зв'язку з його досить високою вартістю. В металургійних процесах застосовується низькотемпературна плазма (105 К), із ступенем іонізації 1%. В даному методі можуть виникнути певні проблеми при виплавці сплавів типу Me–Cr–Al–Y, а саме: неконтрольований високий ступінь перегрівання може призвести до великих втрат компонентів сплаву через їх випаровування.

Більш доцільним було б застосування технологій з чітким контролем нагріву та виключенням газового середовища в робочому просторі установки.

Вакуумно-індукційний переплав передбачає приготування сплаву у вакуумі з використанням шлаку з наступним розливом у ливарні форми. До переваг даного методу можна віднести високий рівень перемішування металу, що сприяє усередненню хімічного складу, але конструктивні особливості методу зменшують площу реагування розплаву з рафінуючим середовищем і залежно від режиму видалення домішок може знижуватися загальний ступінь рафінування. Важливим недоліком цього методу є застосування тиглів, що виготовлені із вогнетривких матеріалів, що контактують з розплавом. Наведення шлакової ванни є також негативним технологічним параметром виплавки жаростійких сплавів. Вакуумно-індукційний переплав застосовується для виготовлення заготовок і подальшого перепау, тобто в технологіях з декількома перепадами, що збільшує собівартість таких сплавів [7].

Електронно-променева технологія включає в себе широкий діапазон таких можливостей: застосування незалежного джерела нагріву; використання високого вакууму (10–3 Па); використання водоохолоджуваної оснастки, що не реагує з розплавом; можливість збільшення поверхні реагування розплаву з рафінуючим середовищем — вакуумом при використанні технологій електронно-променевого перепау з проміжною ємністю [8].

Згідно [9] перевагами електронно-променевої технології є: рафінуюча здатність процесу по видаленню легколетючих домішок; суттєве зниження вмісту домішок проникнення (O, C, H, N), що визначають структуру та механічні властивості металів; відсутність корозії обладнання, довготривалий термін його використання; можливість автоматизації процесу плавки; рівномірність структури сплавів з регулюванням розміру зерна.

На сьогодні жаростійкі сплави знаходять широке застосування як матеріали покриттів виробів, що працюють при підвищених температурах.

Відомі сплави типу Me–Cr–Al–Y (де Me — Co, Fe, Ni). Найвідомішими виробниками сплавів типу Me–Cr–Al–Y є: SulzerMetco, Ptair Tech, Carpenter Tech (USA) [10–12]. На Україні в промислових масштабах відомі два виробники сплавів типу MeCrAlY: Pratt&Whitney Міжнародний центр електронно-променевої технології ІЕЗ ім. Є. О. Патона (Київ), що отримує сплави марок СДП та НВП “Елтехмаш” (Вінниця), що виробляє сплави марок МЗП. Хімічний склад сплавів виробництва НВП “Елтехмаш” (Вінниця) наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Жаростійкі сплави типу Me–Cr–Al–Y та їх склад [13]

Марка МЗП	Компоненти, % (мас.)									Домішки, % (мас.)	
	Co	Ni	Cr	Al	Y	Hf	Zr	Si	Fe	Cu	C
МЗП-1	Осн.	0,1–2	21–25	11–13	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-2	Осн.	8–12	18–24	10–14	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-3	Осн.	0,1–2	21–25	4–6	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-4	Осн.	8–12	18–24	4–6	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-5	18–22	Осн.	18–24	11–13	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-6	–	Осн.	18–24	11,5–13	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-7	–	Осн.	18–24	4–6	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-8	8–10	Осн.	18–24	10,5–13	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	0,3	0,05	0,05
МЗП-9	–	–	18–24	10–13	0,4–1,8	0,05–0,2	0,05–0,4	0,05–0,5	Осн.	0,05	0,05
МЗП-10	Осн.	–	28–32	7–10	0,8–1,6	–	–	2,0–4,0	–	–	–

Сплави на основі заліза в якості покриття застосовуються досить рідко, що пов'язано із великою спорідненістю заліза до кисню. Але ці сплави (МЗП-9) досить поширені при зовнішньому покритті деталей, що працюють при температурах до 1000 °С [14].

Найпоширенішими є сплави на основі кобальту та нікелю. Сплави на основі кобальту мають ряд переваг перед сплавами на основі нікелю, а саме: більш стійкі в умовах високотемпературної корозії; мають більш високу теплопровідність та більш низьке термічне розширення.

Сплави на основі кобальту зазвичай мають матрицю з ГЦК граткою. Вони являють собою тверді розчини (із структурою аустеніту), а також містять один чи більше карбідів. Міцність сплавів досягається як створенням твердого розчину хрому в кобальті, так і за рахунок зміцнення карбідами. Нікель стабілізує ГЦК гратку цих сплавів, зменшує схильність переходу ГЦК в ГПУ гратку, що спостерігається при додаванні тугоплавких металів [15]. Алюміній захищає від окиснення шляхом утворення оксидів вздовж меж зерен. Проте за

II. Результати наукових досліджень

рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення оксидної плівки та зерна сплаву протікає його руйнування при циклічних змінах температури. Плівка оксиду утворюється на поверхні виробу. Швидкість утворення захисної плівки оксиду алюмінію прямопропорційна швидкості окиснення. Утворення цієї плівки залежить від активності алюмінію та його дифузії в сплаві. Хром суттєво підвищує активність алюмінію та швидкість його дифузії, а ітрій в свою чергу забезпечує достатню міцність зчеплення алюмінієвих оксидів з покриттям [16–18]. Навіть невелика кількість Y (0,01–0,03%) збільшує також зчеплення оксидної плівки з покриття із сплаву Me–Cr–Al–Y [16].

На рис. 1 наведено вигляд одного із зливків ($d = 60\text{--}138\text{ мм}$, $l = 1900\text{ мм}$) та слябів ($140 \times 160\text{ мм}$), отриманих на НВП “Елтехмаш” електронно-променевою плавкою, що в подальшому використовуються для одержання порошку сплавів типу Me–Cr–Al–Y.



Рис. 1. Зливки та сляб із сплавів Me–Cr–Al–Y електронно-променевою плавкою

Виправку слябів та зливків здійснювали на установці Л-4. Загальний вигляд цієї установки наведено на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд промислової електронно-променевої установки Л-4 для плавки металів та сплавів

Принципова схема установки Л-4 наведена на рис. 3. Промислове обладнання дозволяє проводити переплави безпосередньо в кристалізатор із використанням проміжної ємності. Матеріал, що переплавляється, може бути у вигляді зливків, шихти, стрижнів та спресованої стружки.

Технічні характеристики електронно-променевої установки Л-4 наведено в табл. 2.

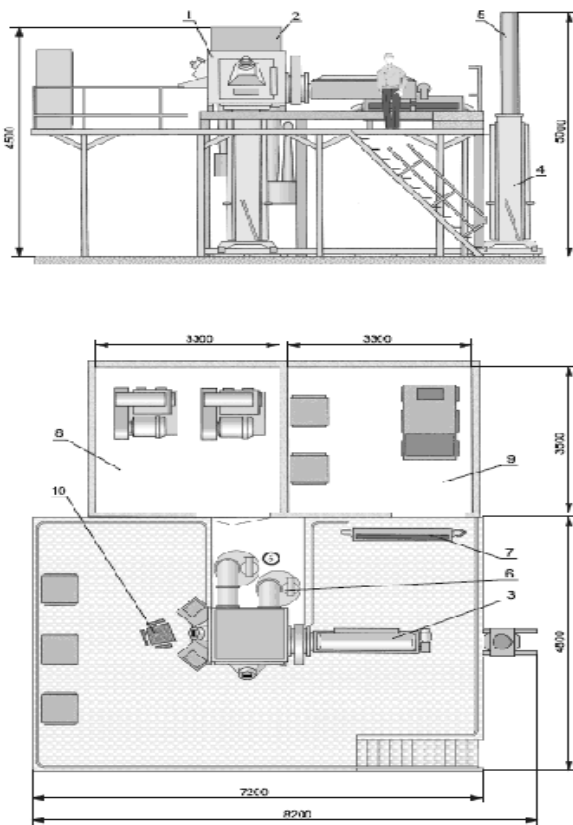


Рис. 3. Принципова схема електронно-променевої установки Л-4:
 1 — робоча камера, 2 — блок електронних гармат, 3 — горизонтальний механізм подачі заготовок на плавку, 4 — механізм витягування зливку, 5 — зливков, 6 — вакуумна система, 7 — система охолодження, 8 — форвакуумні насоси, 9 — система живлення установки, 10 — місце оператора

Таблиця 2

Технічні характеристики електронно-променевої установки Л-4

Параметри	Величина
Встановлена потужність, кВт	250
Напруга трьохфазної живлячої мережі промислової частоти 50 Гц, В	380
Прискорююче напруження електронних гармат, кВ	20
Кількість та номінальна потужність електронних гармат $n \times$ кВт:	4×60
Максимальний розмір заготовок, що переплавляються, мм:	
– переріз	200×200
– довжина	1500
Максимальний розмір виплавлених злиwkів, мм:	
– переріз	300×300
– довжина	2000
Швидкість витягування виплавлених злиwkів, мм/хв.	8,5–850
Ступінь вакууму у робочій камері, Па	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$
Площа, яку займає установка, м ²	65
Маса установки, т	20

Отримання порошків сплавів на основі кобальту

Для отримання порошків на основі кобальту використовують такі методи: автоклавний, карбонільний, електролітичний та метод амальгамної металургії [19]. Розглянемо більш детально кожен із цих методів отримання простих порошків.

Автоклавний метод використовується для виробництва порошків кобальту, нікелю та міді. Відповідний метал витісняється воднем в розчині, що складається із його сполук, під тиском і осідає у вигляді твердих частинок на дно камери реактору. Вихідну сировину (рудні концентрати, скрап або відходи металообробки) піддають обробці сірчаною кислотою або оксидному аміачно-карбонатному вилуговуванню, яке часто проводять при підвищених тисках. Отриманий розчин сульфату чи комплексної аміачної солі металу очищують від домішок і подають в автоклав на відновлення воднем. При відновленні воднем із аміачних розчинів підтримується оптимальне співвідношення концентрацій NH_3 і металу рН розчину (рН зменшується із збільшенням тиску водню) та тиск водню.

В промисловості автоклавний порошок кобальту отримують обробкою аміачно-сульфатних розчинів воднем. Повне відновлення кобальту можливе лише при $\text{pH} > 4$, у зв'язку з чим відновлення воднем проводять із розчинів, що містять аміачні комплекси $\text{Co}(\text{NH}_3)_2^{2+}$ та $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Гомогенне зародкоутворення протікає досить повільно, тому використовують гетерогенне, вводячи в розчин затравку (дрібний порошок кобальту).

При автоклавному методі контролюють порошки кобальту на розмір, текстуру, насипну густину, текучість та питому поверхню.

Введення ПАВ дозволяє впливати на крупність частинок порошку, отримувати монофракційні порошки. Однак вони є джерелом забруднення порошку вуглецем та сіркою; вміст нікелю, міді, марганцю, заліза визначається ступенем очищення розчину. Склад звичайного кобальтового порошку наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Склад та деякі властивості Со порошку, отриманого автоклавним методом

Склад порошку виробництва фірми Sherritt, % (мас.)										
Co	Ni	Cu	Fe	S	C	H	Si	Cr	Zr	Pb
99,8	0,08	0,006	0,01	0,02	0,03	—	—	—	0,001	0,001
Властивості порошку виробництва фірми Sherritt										
Насипна маса, г/см ³						Текучість, г/см				
2,5–3,2						2,2				
Вміст фракцій порошку виробництва фірми Sherritt, %										
–300+150 мкм			+74 мкм			+44 мкм			–44 мкм	
15			45			25			14,5	

Автоклавним методом окрім порошків кобальту також отримують композиційні порошки на його основі, використовуючи затравки карбідів та боридів металів та покривають їх шаром кобальту в присутності ПАВ

(антрахіона та його похідних). Хімічний склад та деякі властивості композиційних порошків наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Властивості композиційних порошків на основі кобальту, отриманих автоклавним способом (крупність зміцнюючої фази, що вводиться — 44 мкм)

Метал у зміцнюючій фазі карбіду	Частина покриття, %	Вміст, % (мас.)		Середній розмір, мкм	Насипна маса, г/см ³
		Co	S		
W	81,3	18,6	0,01	14,8	—
Mo	77,9	20,0	0,035	6,0	1,56
Ti	78,9	19,5	0,09	3,8	1,23
Cr	80,7	18,4	0,046	7,0	2,0

Карбонільним методом одержують дрібнодисперсний чорний порошок кобальту при розкладанні карбонілу у струмі монооксиду вуглецю при температурі 147–247 °С з наступною термообробкою при 347–927 °С в атмосфері водню. При розкладанні карбонілу кобальту в інертних органічних розчинах (декалін, силіконові та вазелінові масла, гліцерин та др.) отримують тонкий пасивований порошок, що містить близько 99,99% кобальту та 0,01% вуглецю. Органічна рідина запобігає виникненню контакту з повітрям та укрупненню колоїдних металевих частинок, що утворюються. Завдяки адсорбції рідини на поверхні частинок металу формується захисна плівка, що запобігає окисненню та займанню порошку. На сьогодні такі порошки використовуються досить рідко через низьку продуктивність та незадовільну якість порошку.

Електролітичний кобальтовий порошок отримують у ванні з розчинними кобальтовими анодами із сульфатного електроліту при рН = 5,5–6. У зв'язку з низьким перенавантаженням водню на кобальті вихід за струмом досить малий (близько 60%). Для пригнічення процесу виділення водню підтримують високі значення рН розчину, при якому на аноді протікає розчинення кобальту та розкладання води з виділенням кисню. Катодний вихід за струмом нижчий за анодний, так що з часом концентрація кобальту у розчині збільшується. Для підтримання заданої концентрації електроліт розчиняють концентратом. Склад кобальтового порошку отриманого цим методом наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Хімічний склад та розподіл за фракціями кобальтового порошку

Хімічний склад кобальтового порошку						
Co	Ni	Cu	Fe	S	C	Cr
99,25	0,4	0,04	0,2	0,025	0,02	0,1
Вміст фракцій кобальтового порошку, %						
+71 мкм		+45 мкм		–45 мкм		
4		30		66		

Методом амальгамної металургії отримують тонкодисперсні порошки. Електроосадження кобальту та його сплавів із залізом та нікелем проводять при 40 °С із сульфатного електроліту (94 кг/м³ Co) на перемішуючому ртутному катоді у ванні із розчинним анодом із кобальту (або сплавів відповідного складу) при міжелектродній відстані 1 см. Анодна та катодна щільності струму однакові і складають 500 А/м². Необхідну величину рН = 2

II. Результати наукових досліджень

досягають введенням соляної кислоти. Після електролізу амальгаму піддають термообробці. При цьому частинки кобальту змінюють свою форму із дендритної на голчасту, ниткоподібну. В амальгаму вводять метали, що запобігають агломерації частинок. Після термообробки концентрують амальгаму фільтруванням та проводять її орієнтування в магнітному полі. Остаточне видалення ртуті здійснюють дистиляцією, а спечена маса після дистиляції подрібнюється в порошок, окремі зерна якого складаються із однодомених частинок розміром 0,5–1,5 мкм.

Альтернативні електролізні способи отримання порошку кобальту наведені у табл. 6.

Таблиця 6

Електролізне отримання порошків на основі кобальту

Спосіб	Електроліт, кг/м ³	Густина струму, кА/м ²	T, °C	Показники електролізу та його умови
Електроліз водного розчину	CoSO ₄ ; (NH ₄) ₂ H ₃ BO ₃ ; Na ₂ SO ₄	1,0	27	Голкоподібні та віялоподібні дендрити
Електроліз із двошарової ванни	Co 23–24; NaCl < 25	3,0–4,0	25	Вихід за струмом складає 85–87%; хлоридний розчин
Електроліз із двошарової ванни	Co 50	4,5	25	СГ : SO ₄ ²⁻ = 1 : 5 вихід за струмом 78–85%; зі збільшенням SO ₄ ²⁻ вихід за струмом падає
Відновлення твердої фази	NaOH 400	1	80	Сировина Co ₃ O ₄ або CoCO ₃ · 2CoO · 2H ₂ O, розмір 0,5–1 мкм, час електролізу (4–5)t _{теор} для оксиду і (7–8)t _{теор} для CoCO ₃

Порошки складнолегованих сплавів на основі кобальту отримують методами розпилення (атомізації). На рис. 4 наведено схему промислової технології отримання складнолегованого порошку виробництва SulzerMetco: спочатку порошки сплавів розпилюють в атмосфері інертного газу, потім класифікують їх за розмірами, змішують, проводять контроль властивостей та розмірів і запаковують у герметичні ємності, які в подальшому потрапляють до споживача. Порошки сплавів, отримані цим методом, містять певну кількість домішок проникнення, які потрапляють в порошок сплаву в процесі його отримання при газовій атомізації. Домішки утворюють з елементами сплаву оксиди, які знижують корозійну стійкість покриттів з цих порошків.

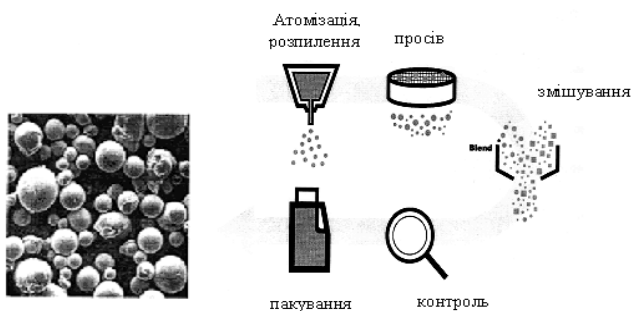


Рис. 4. Технологічна схема одержання порошку складнолегованого сплаву на основі кобальту виробництва фірми SulzerMetco

З аналізу літературних даних видно, що найбільшою проблемою є окиснення порошків сплавів, що, як відомо, залежить від хімічного складу та розміру частинок порошку. Чим більший вміст елементів, активних до кисню, і менший розмір частинок порошку, тим вони швидше окиснюються [13, 20–22]. В роботі [20] було досліджено вплив розміру частинок на їх окиснення на прикладі порошків сплавів виробництв фірм SulzerMetco та Hunan Institute of Metallurgy&Material (China). Дані наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Хімічний склад та розміри вихідних порошків

Тип порошку	Склад, % (мас.)				Номінальний діапазон розмірів, мкм	Виробник
	Ni	Cr	Al	Y		
P-1	основа	31	11	0,6	–90+37	SulzerMetco
P-2	основа	25	6	0,4	–30	Hunan Institute of Metallurgy&Material (China)

Таблиця 8

Залежність окиснення порошку від розміру його частинок

Тип порошку	Діапазон номінальних розмірів частинок, мкм	Вихідний порошок	Вміст кисню, % (мас.)
Тип-А	–76+63	P-1	0,02
Тип-Б	–63+54	P-1	0,03
Тип-С	–50+37	P-1	0,06
Тип-Д	–30+25	P-2	0,61
Тип-Е	–25	P-2	0,62

Аналіз наведених в табл. 8 даних впливу розподілу за фракціями на процес окиснення показує, що в діапазоні фракцій порошку від –76+63 до –25 мкм спостерігається зміна вмісту кисню більш ніж у 70 раз.

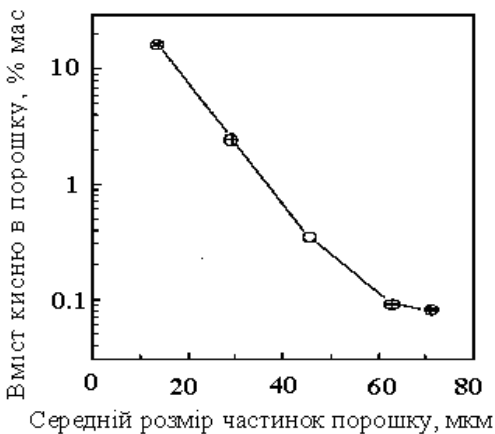


Рис. 5. Вплив розміру частинок порошку на вміст кисню у ньому

Результатом цієї роботи на прикладі порошків кобальту та композиційних порошків на його основі є порівняльний аналіз використання найбільш відомих технологічних процесів на властивості цих порошків.

II. Результати наукових досліджень

Приведены данные о современных методах получения сплавов и порошков на основе кобальта. Рассмотрены промышленные методы получения порошковых сплавов, их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: *сплав типа Me–Cr–Al–Y, технология получения сплавов и порошков из них, преимущества, недостатки, перспективы.*

Modern methods for obtaining alloys and powders on basis of cobalt are informed. Industrial methods obtaining of the powder alloys are considered, theirs advantage and deficiency are shown.

Keywords: *Me–Cr–Al–Y alloys, technology of obtaining powder and alloys based on it, advantage, deficiency, perspective.*

1. Симс Ч. Т. Суперсплавы / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф. – Часть 2. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
2. Долговечность двухслойных покрытий металл-керамика на рабочих лопатках газовых турбин / Б. А. Мовчан, И. С. Малашенко, Н. П. Вашило и др. // Специальная электрометаллургия. – 1962. – Вып. 87. – С. 44–53.
3. Пат. 2120494 Российская Федерация. Способ получения на подложке защитных покрытий с градиентом химического состава по толщине с внешним керамическим слоем / Б. А. Мовчан, Ю. Э. Рудой, И. С. Малашенко – опубл. 20.10.1998.
4. Гречанюк Н. И. Современные электронно-лучевые технологии получения новых материалов и покрытий (обзор) // Вісник УМТ. – 2010. – № 1. – С. 7–15.
5. Жеребцов С. Н. Применение технологии электрошлакового переплава для производства изделий из хромо-никелевых сплавов // Технология Машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 12–15.
6. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін. – К.: Вища школа, 2006. – 504 с.
7. Григоренко Г. М. Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и охлажденных секционных кристаллизаторах / Г. М. Григоренко, И. В. Шейко. – К.: Сталь, 2006. – 320 с.
8. Сучасні методи виплавки жаростійких сплавів для нанесення покриттів / Ю. А. Литвенюк, М. І. Гречанюк, Д. Ф. Чернега // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2007. – № 6. – С. 75–79.
9. Современные электронно-лучевые технологии как эффективные высокотемпературные методы обработки металлов с получением слитков, защитных покрытий и композитов / Н. И. Гречанюк, А. П. Мухачев // Сборник научн. трудов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 27 – 38.
10. Seo D. Effect of particle size range on thermally grown oxide scale formation on vacuum plasma sprayed CoNi- and CoCrAlY coatings / D. Seo, K. Ogawa, T. Shoji, S. Murata // [Электронный ресурс]: Матеріали конференції. International Thermal Spray Coatings 2007. (Singapore). Режим доступа: http://www.asm.confex.com/data/manuscript/asm/itsc07/paper15657_manuscript_794_0.pdf.
11. Praxair. Powder solution coatings. [Электронный ресурс]: Довідник. Режим доступа: <http://www.praxair.com/termspray>.
12. Pat. 7763573 US. Method for producing composite material for coating application / P. Hajmrle, W. Walkhous, P. Fiala. – Опубл. 27.06.2010.

13. *TU У 27.4-20113410.002-2001*. Матеріали захисних покриттів для випаровування у вакуумі. / М. І. Гречанюк. – Опубл. 30.10.2008
14. *Жаропрочность* литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 256 с.
15. *Симс Ч.* Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
16. *Мовчан Б. А.* Жаростойкие покрытия осажденные в вакууме / Б. А. Мовчан, И. С. Малашенко. – К.: Наук. думка, 1983. – 232 с.
17. *SprayTech*. [Електронний ресурс]: Довідник. Режим доступу: [http // www. Tecnospray.net/ download/ materiali_riporto/ note 20%per%20McrAlY. pdf](http://www.Tecnospray.net/download/materiali_riporto/note%20per%20McrAlY.pdf).
18. *Task M. N.* The effect of composition and microstructure on the reaction behavior of MCrAlY alloys under variety of aggressive environmental conditions. – Pittsburgh, 2009. – 136 p.
19. *Порошки*. Справочное издание / под ред. С. С. Набойченко. – М.: Металлургия, 1997. – 542 с.
20. *Chang-Jiu Li.* Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition / Li. Chang-Jiu, Li. Wen-Ya // *Surface&Coatings technology*. – 2002. – 162. – P. 31–41.
21. *Chang-Jiu Li.* Self-strengthening of the adhesion of HVOF sprayed MeCrAlY coatings / Li. Chang-Jiu, Li. Wen-Ya // *Surface&Coatings technology*. – 2001. – 145. – P. 31–41
22. *Chang-Jiu Li.* Effect of powder size on the oxidation of MCrAlY particles during HVOF spraying / Li. Chang-Jiu, Li. Wen-Ya // *Prpceedings of international ThermalSpray Conference, March 3–5, 2002, Essen*.