

## Технологія отримання порошку сплаву CoCrAlYSi

О. П. Василега, К. О. Гогаєв, М. І. Гречанюк,  
В. Г. Затовський

*Запропонований новий метод отримання порошку сплаву CoCrAlYSi. Детально описано його особливості та переваги в порівнянні з відомими технологіями.*

**Ключові слова:** порошок сплаву CoCrAlYSi, подрібнення, електронно-променевий переплав.

### Вступ

Натепер порошки сплавів CoCrAlYSi в основному отримують за двома технологіями. Перша являє собою виплавку сплавів із чистих шихтових матеріалів методами спеціальної електрометалургії і наступне подрібнення цих сплавів механічними методами. До методів спеціальної електрометалургії, якими отримують сплав CoCrAlYSi, відносять такі: електрошлаковий, вакуумно-дуговий, плазово-дуговий, вакуумно-індукційний та електронно-променевий переплави [1—7]. Далі зливки подрібнюються на валкових дробарках, основним призначенням яких є подрібнення крихких матеріалів від початкових розмірів до кусків розмірами 4 мм. А подальший розмел кускового матеріалу проводять на млинах різних типів (кульові, вібраційні, атриторні, планетарні, вихрові та ін.). При подрібненні на млинах порошки, що отримуються забруднюються, з одного боку, матеріалом розмельних тіл та стінками млина (кульові, вібраційні, атриторні, планетарні), а з іншого — киснем (вихрові). Ще одним недоліком, що виникає під час інтенсивного розмелу, є нагрівання порошку, яке пришвидшує процеси окиснення [8]. Також до недоліків такої технології отримання порошку можна віднести значні енерговитрати, що складають близько 3 кВт·год/кг [8].

Другою технологією отримання порошків сплавів є розпилення, що включає такі стадії: завантаження вихідних матеріалів, їх подальше плавлення, подачу розплаву в металоприймач, а з нього через форсунки в камеру розпилення [9—13]. Технологічна схема отримання порошку сплаву методом розпилення компанії Praxair наведена на рис. 1 [9] і являє собою розпилення порошку, його охолодження, класифікацію за розмірами

та пакування. Основними недоліками методів розпилення є те, що загальний вміст домішок впровадження в

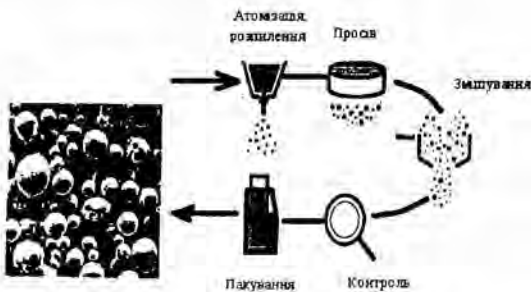


Рис. 1. Промислова технологія отримання порошку сплаву компанії Praxair [9].

порошках складає близько 2% (мас.), що є неприпустимим, оскільки ці порошки застосовуються в якості жаростійких покриттів на лопатки ГТД, та вихід придатного порошку (фракції 40—100 мкм) для подальшого отримання жаростійкого покриття складає 50—60% [11—14].

Метою даної роботи є розробка продуктивної та економічно вигідної технології отримання якісних порошків сплавів  $\text{CoCrAlYSi}$  з високим виходом придатного порошкового матеріалу для покриття лопаток ГТД.

### Результати та їх обговорення

Враховуючи наведене, нами було запропоновано технологію отримання порошку сплаву по дуплекс процесу, що полягала у виплавці зливків на електронно-променевої плавильній установці УЕ-174 (підприємства “Елтехмаш”) та їх подрібненні на стрічкопротязному стані. Запропонована технологія є безвідходною, оскільки порошок фракції менше 40 мкм іде на подальший електронно-променевої переплав.

На першому етапі виплавляли зливки та сляби на установці УЕ-174, призначеній для електронно-променевого переплаву (рис. 2). Електронно-променева плавильна установка УЕ-174 являє собою вакуумну камеру з механізмами та системами, що забезпечують проведення технологічного процесу плавки металів та сплавів у вакуумі під дією концентрованих джерел енергії — електронних променів (рис. 3). Вакуумна робоча камера установки розподілена на два об'єми: плавильний (робочий) та електронних нагрівачів. Вакуумна система установки дозволяє створювати в об'ємі плавильної камери вакуум до  $6,3 \cdot 10^{-2}$  Па, а у відділенні електронних нагрівачів — до  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, що забезпечує їх стабільну роботу та необхідний рівень вакуумного рафінування переплавленого металу протягом всього технологічного процесу. В середині робочої камери розташована змінна технологічна оснастка, що складається з кристалізатора та проміжної ємності розмірами 180x160x60 мм. У вказаній ємності сплавляється шихта, що подається із завантажувальної камери механізми подачі шихти. Проміжна ємність використовується для накопичення розплаву, вирівнювання та усереднення його хімічного складу, рафінування від домішок (в тому числі й газових) і неметалевих включень. В процесі плавки в проміжній ємності утворюється гарнісаж, що захищає її дно й стінки від взаємодії з розплавленим металом. Металевий розплав з проміжної ємності порціями зливається до кристалізатора, який являє собою порожнистий звмкнений контур (об'єм). Його внутрішня частина, що контактує з металом зливка, виконана із водоохолоджуваної міді. Проміжна ємність та кристалізатор складають єдиний вузол, змонтований на сталій рамі та закріпленій в камері плавки. Конструктивна схема закріплення оснастки в середній камері дозволяє оперативно змінювати її вузли при потребі змінити розмір виплавлених зливків.



Рис. 2. Загальний вигляд установки УЕ-174 для електронно-променевого переплаву.

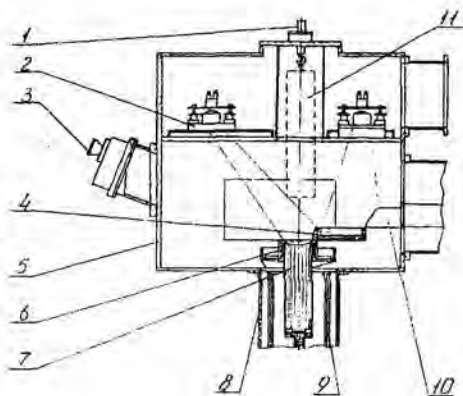


Рис. 3. Схема електронно-променевої установки UE-174: 1 — механізм вертикальної подачі; 2 — електронно-променевий нагрівач; 3 — пристрій для спостереження; 4 — проміжна ємність; 5 — робоча камера; 6 — водоохолоджувальний кристалізатор; 7 — виплавлений зливков; 8 — механізм формування та витягування зливка; 9 — теплоізоляційні екрани; 10 — бічний механізм подачі шихтових матеріалів; 11 — переплавленна заготовка.

Виплавку зливків сплавів  $\text{CoCrAlYSi}$  здійснювали наступним чином. В ємність бічного механізму подачі шихтових матеріалів (рис. 3) в необхідній пропорції з урахуванням угару закладалися вихідні (шихтові) матеріали:  $\text{Co}$  марок K0, K1, K2 (ГОСТ 123-92) [15];  $\text{Cr}$  металевий марки X-99 (ГОСТ 5905-2004) [16];  $\text{Al}$  марки A8 (ГОСТ 11070-74, 11069-2001) [17];  $\text{Y}$  марок ItM 1, ItM 2 (ТУ 48-4-208-77) [18];  $\text{Si}$  металургійний (ГОСТ 2169-69) [19] чистотою не нижче 99,5% (мас.). За допомогою спеціального пристрою шихтові матеріали подавалися в проміжну ємність, де за допомогою електронно-променевих гармат здійснювалося їх плавлення та рафінування. Рідкий метал відповідного складу зливався у водоохолоджувальний кристалізатор, де і відбувалося формування зливка. Швидкість витягування зливка узгоджується із швидкістю подачі шихтових матеріалів у проміжну ємність. Витягування зливків відбувалося за допомогою механізму формування та витягування зливка. Після завершення технологічного процесу виготовлення сплаву  $\text{CoCrAlYSi}$  і його охолодження проводили розгерметизацію робочої камери і видалення зливка. Хімічний склад вихідних шихтових матеріалів та зливків, отриманих після електронно-променевого переплаву наведено у таблиці.

Отримані зливки та сляби з розмірами  $d = 60\text{—}138$  мм,  $l = 500\text{—}1000$  мм та  $140 \times 160 \times 60$  мм відповідно піддавали механічному подрібненню на гідравлічному пресі П472Б. Даний спосіб дозволяє руйнувати кусковий матеріал розміром від 200 до 3 мм одночасно. В нашому випадку руйнування матеріалу здійснювали

#### Хімічний склад вихідних (шихтових) матеріалів та зливків

Елемент	Хімічний склад шихти, % (мас.)	Середній хімічний склад зливків після електронно-променевого переплаву шихти, % (мас.)
Co	Основа	Основа
Cr	31,5	26—30
Al	13,5	10—13
Y	0,65	0,4—0,6
Si	3,23	2—4

в стальній обоймі висотою 200 мм під дією пуансона із штампової сталі ХВГ. Особливістю пристрою для подрібнення є те, що розмір пуансона по діаметру та внутрішній діаметр обойми мають абсолютно вільну посадку, це виключає можливість заклинювання обойми з пуансоном дрібними частинками сплаву. При подрібненні на пресі П472Б забезпечу-

ється номінальне зусилля 0,62 МН. В об'ємі обойми, заповненої матеріалом, що подрібнюється, під дією пуансона діаметром 100 мм досягається тиск до 8 МПа, який виявляється цілком достатнім для ефективного подрібнення матеріалу.

В залежності від вихідних розмірів кусків матеріалу за один хід плунжера преса забезпечується вихід кусків матеріалу розміром менше 12 мм до 60—70%, які на пресі вже не подрібнюються. Більш великі куски піддаються повторному подрібненню на пресі з новою порцією кускового матеріалу. Таким чином, ступінь подрібнення, що є відношенням початкового розміру кускового матеріалу до розміру подрібненого, за одноразовий процес складає від 10—15 одиниць до 100 і навіть більше, оскільки при пресовому подрібненні ~1% частинок досягають розміру менше 40 мкм. Процес руйнування сплаву CoCrAlYSi на пресі в об'ємі досить ефективний, продуктивність складає до 50 кг/год. Для подрібнення на пресі є характерною відсутність намелу матеріалу подрібнюючого інструменту, що присутній при подрібненні на млинах та дробарках [4]. При використанні пресу П472Б енерговитрати незначні і складають всього 0,023 кВт·год/кг при потужності електродвигуна 2,8 кВт. Фракційний склад (% (мас.)) матеріалу після подрібнення на пресі складає: великі куски від 7 до 12 мм — близько 50; куски розміром 3—7 мм — 25—30, крупний порошок 0,5—3 мм — 15—18; порошок фракції 0,1—0,5 мкм — до 5; порошок фракції 40—100 мкм — до 2; порошок фракції менше 40 мкм — до 1.

Подальше подрібнення сплаву CoCrAlYSi здійснюється на двовалковому стрічкопротяжному стані (рис. 4). Цей стан дає можливість проводити поетапне руйнування крихкого кускового матеріалу з поперечним розміром від 12 мм між валками, що обертаються. Швидкість обертання приводного валка варіюється до 100 об./хв; у випадку подрібнення сплаву CoCrAlYSi оптимальний режим обертання становить 11 об./хв. Потужність двигуна стрічкопротяжного стану 4 кВт забезпечує зусилля для ефективного подрібнення. Проміжок між валками варіюється від 0,3 до 10 мм. По мірі подрібнення матеріалу цей проміжок зменшується. Процес подрібнення ефективно протікає для кусків сплаву від 10 мм до 3 мм при проміжку між валками, що становить 0,5—0,7 максимального розміру кусків матеріалу, а при розмелі частинок <2 мм проміжок між валками поступово зменшується. Відношення цього розміру

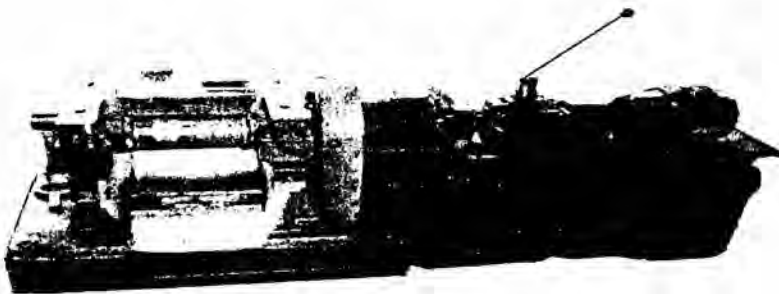


Рис. 4. Загальний вигляд стрічкопротяжного стану.

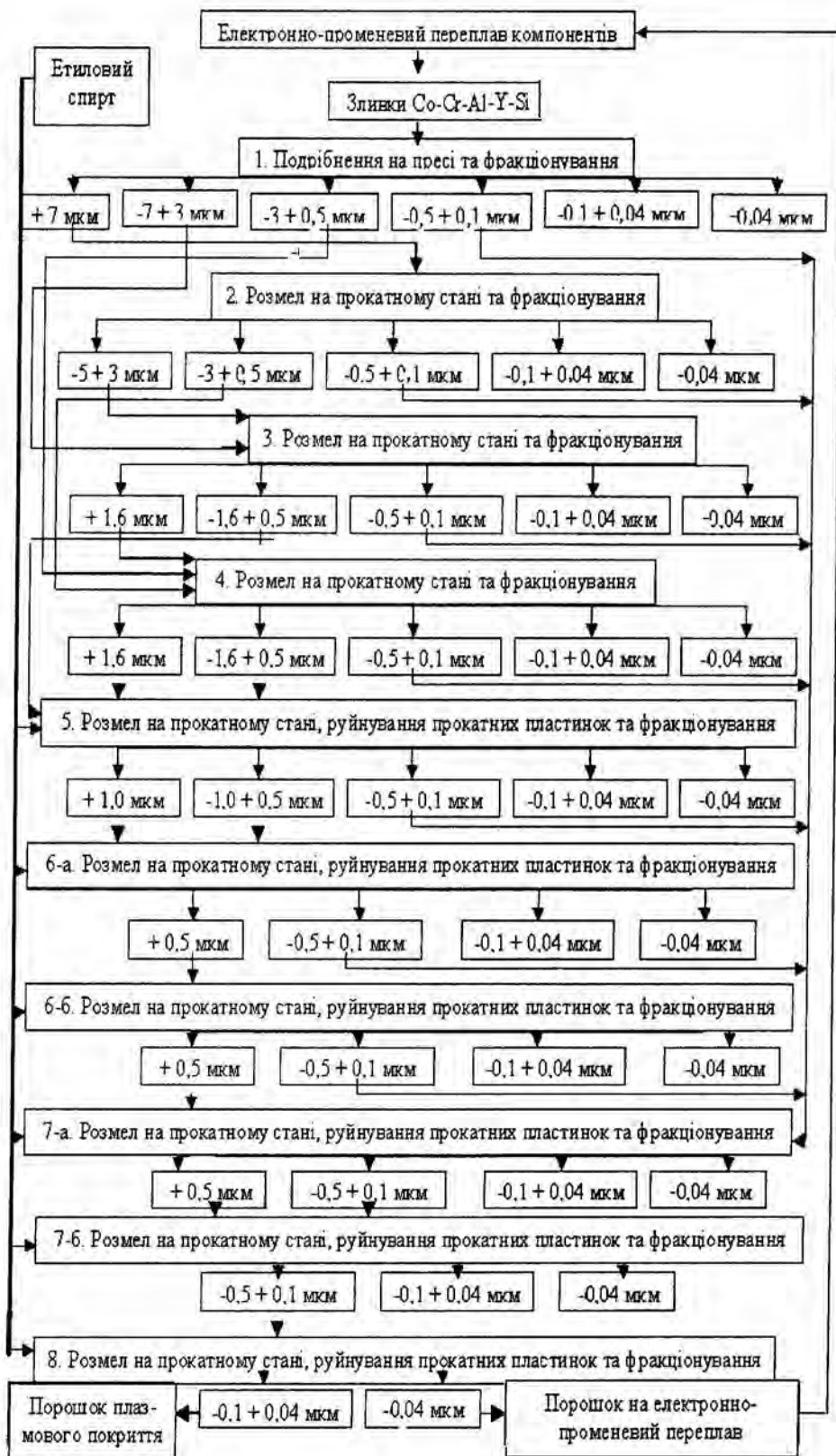


Рис. 5. Технологічна схема отримання порошку сплаву CoCrAlYSi.

до максимального поперечного розміру частинок матеріалу збільшується до 2—3. Зазвичай на цьому етапі розмелу формуються фрагменти стрічки, що легко руйнуються розтиранням.

Таким чином, стрічкопротяжний стан, як основний механізм подрібнення крихкого сплаву  $\text{CoCrAlYSi}$ , дозволяє одержати поетапним розмелом порошок сплаву будь-якої фракції, аж до пилу нанометричного розміру. Для плазмового нанесення покриттів визначено, що оптимальний фракційний склад порошку сплаву  $\text{CoCrAlYSi}$  становить 40—100 мкм [11—13]. Тому, згідно з технологічною схемою, що наведена на рис. 5, на кожному етапі подрібнення (розмелу) на стрічкопротяжному стані відсіваються порошки розміром <100 та <40 мкм. Останній (мілкий) порошок йде на повторний електронно-променевий переплав. Відсівання необхідної фракції здійснюється на вібраційному ситовому аналізаторі типу 028М трьома ситами ( $\varnothing 200$  мм,  $h = 45$  мм) з отворами сіток 325, 100 та 40 мкм. Досліджено залежність виходу фракції порошку менше 100 мкм, що визначається відношенням

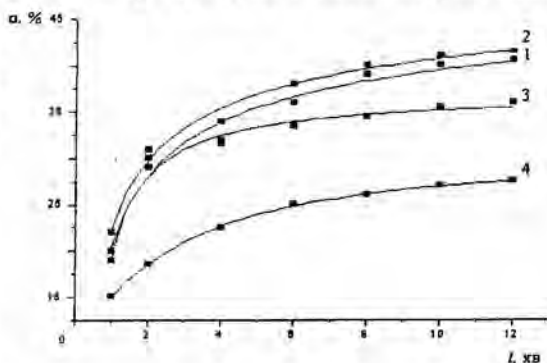
$$\alpha = \frac{m_{-01}}{m_0} (\%), \quad (1)$$

де  $m_{-01}$  — кількість порошку після просіву;  $m_0$  — завантажена кількість порошку, що просівається, від часу просівання для різних мас завантаження порошку розміром менше 0,5 мм (рис. 6). Знайдено, що оптимальним завантаженням на сито 325 мкм є маса порошку 1,5—1,7 кг, а час просівання при цьому становить 10—12 хв.

При подрібненні матеріалів до частинок <1,6—2 мм розмел на прокатному стані проводиться із зволоженням порошку етиловим спиртом, оскільки на цьому етапі прокатки спостерігається інтенсивне пиловиділення. Також в зоні прокатки розвиваються інтенсивні деформаційні процеси, що супроводжуються локальним тепловиділенням, яке може призводити до поверхневого окиснення порошку, що подрібнюється. Змочування етиловим спиртом за рахунок пасивації поверхні частинок запобігає окисненню. При подрібненні мілкового порошку утворюються фрагменти стрічки, яка після просушування при температурі 80 °С легко руйнується розтиранням на порошок.

Оскільки процес руйнування будь-яких крихких матеріалів залежить від їх початкових властивостей, в першу чергу структурних особливостей, то й розмел даного матеріалу на стрічкопротяжному стані в значній мірі не може бути кількісно однозначним. По-перше, згідно з таблицею, хімічний склад зливків після електронно-променевого переплаву поелементно має коливання в декілька відсотків. По-друге, кристалізація

Рис. 6. Залежність виходу фракції <100 мкм від часу просіву для різних мас завантаження порошку  $m_0$  (кг) розміром <0,5 мм: 1 — 1,0; 2 — 1,7; 3 — 2,0; 4 — 2,3.



зливків, швидкість витягування їх теж впливають на формування структури сплаву. В результаті механічні характеристики сплаву CoCrAlYSi, в першу чергу твердість та міцність, визначають процес руйнування, як на пресі, так і на стрічкопротяжному стані.

Вихід фракції <100 мкм розраховується за відношенням кількості маси цієї фракції до загальної маси розмеленого сплаву

$$W = \frac{M_{01}}{M} (\%), \quad (2)$$

де  $M_{01}$  — кількість порошку фракції <100 мкм;  $M$  — загальна маса розмеленого сплаву.

Залежність виходу фракції порошку <100 мкм від кількості циклів просіювання для маси сплаву, що становила 50 кг, в якості прикладу наведена на рис. 7. На перших етапах вихід необхідної фракції сповільнений, тому що в цей період прокатки проходить в основному руйнування великих кусків сплаву до більш дрібних і лише незначна частка матеріалу набуває мікронних розмірів. Але вже після прокатки частинок розміром 1,8—2 мм інтенсивність розмелу значно зростає, вихід фракції порошку в цей період для наведеного випадку становить до 2—2,5% загальної маси порошку за одне пересіювання. Надалі, коли фракційний склад порошку, що розмелюється на стані, становить 0,1—0,5 мкм, вихід необхідної фракції практично стабілізується і становить ~1% за один цикл пересіювання. Таким чином, процес розмелу на стрічкопротяжному стані в загальному вигляді характеризується трьома періодами руйнування сплаву: руйнування великих кусків (I), інтенсивний розмел середніх частинок (II) та стабілізований розмел частинок <0,5 мкм (III). Слід відмітити, що кількість маси порошку фракційного складу <40 мкм становить 20—35% маси порошку розмірами <100 мкм за умови режиму пересіву, що вже розглядався.

На рис. 8 графічно наведено енерговитрати при руйнуванні сплаву на пресі та розмелу на стрічкопротяжному стані. Звичайно, енерговитрати розмелу зростають при зменшенні розміру частинок сплаву та загальні енерговитрати одержання порошку при приведеному механічному подрібненні набагато нижчі від традиційних методів: в 4 рази менші, ніж при використанні дробарок, млинів і до 20 разів нижчі в порівнянні з розпиленням [20]. Загальні енерговитрати складають всього 0,4 кВт·год/кг. До того ж незворотні втрати матеріалу CoCrAlYSi при подрібненні на пресі та стрічкопротяжному стані не перевищують 2% (мас.).

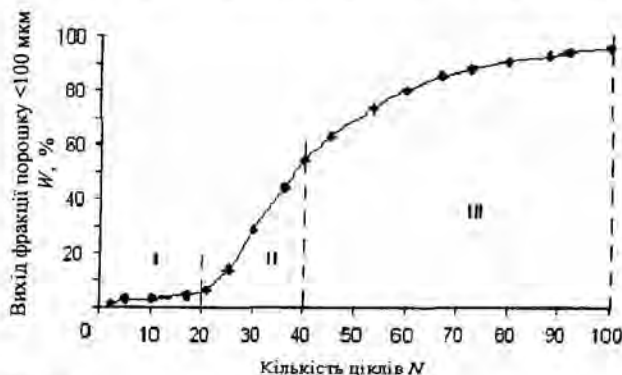


Рис. 7. Залежність виходу фракції порошку <100 мкм від кількості циклів просіювання для сплаву масою 50 кг.

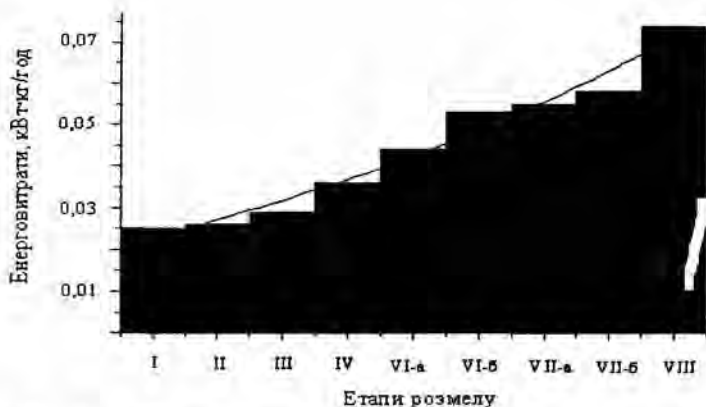


Рис. 8. Поетапні енерговитрати при розмелі порошку  $\text{CoCrAlYSi}$ .

При використанні розробленого авторами методу отримання порошку  $\text{CoCrAlYSi}$  вихід порошку фракцій 40—100 мкм складає 70—72%, тоді як при застосуванні інших технологій він складає 50—60%. Отриманий порошок добре себе зарекомендував в якості теплозахисного покриття на лопатках газотурбінних двигунів.

### Висновки

Розроблена технологія отримання порошку  $\text{CoCrAlYSi}$  фракції 40—100 мкм є більш ефективною в порівнянні з існуючими, оскільки є безвідходною, так як фракція <40 мкм іде на подальший електронно-променевий переплав. Незворотні витрати досить незначні і складають ~2%. Вихід придатного порошку фракції 40—100 мкм складає ~70%, в той час як при інших відомих технологіях отримання цього порошку — 50—60%. Енерговитрати в декілька разів нижчі, ніж при отриманні такого порошку відомими методами. Наведена технологія отриманого порошку впроваджується у виробництво.

1. Литвенюк Ю. А., Гречанюк М. І., Чернега Д. Ф. Сучасні методи виплавки жаростійких сплавів для нанесення покриттів // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2007. — № 6. — С. 75—79.
2. Латаш Ю. В., Торхов Г. Ф., Грановский В. К. Исследование плазменно-дуговой гарнисажной плавки // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1998. — № 4. — С. 31—38.
3. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Медовар Л. Б. Возможности ЭШП в производстве интерметаллидов // Там же. — 1998. — № 1. — С. 9—10.
4. Мровец С., Вербер Т. Современные жаростойкие материалы / Под ред. С. Б. Масленкова. — М.: Металлургия, 1986. — 360 с.
5. Самедов А. С., Усубалиев Т. Б. Комплексная методика выбора состава защитных покрытий для лопаток газовых турбин // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — 49, вып. 2. — С. 73—77.
6. Сердюк Г. Г., Свистун Л. И. Технология порошковой металлургии. Ч. 1. Порошки: (Учебн. пособие) Кубан. гос. технол. ун-та. — Краснодар: изд-во ГО УВПО "КубГТУ", 2005. — 240 с.
7. Степанчук А. Н., Билык И. И., Бойко П. А. Технология порошковой металлургии: (Учебн. пособие). — К.: Вища школа, 1989. — 415 с.



8. Купарисов С. С., Либенсон Г. Л. Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1991. — 431 с.
9. Praxair. Powder solution coatings. [Электронный ресурс]: (Довідник). Режим доступу: <http://www.praxair.com/termspray>.
10. Полема. Жаростойкие сплавы. Порошки. [Электронный ресурс]: (Довідник). Режим доступу: [http://www.polema.metholding.ru/postman/ru/catalog\\_8\\_0\\_42.htm](http://www.polema.metholding.ru/postman/ru/catalog_8_0_42.htm).
11. Metallizing equipment co. Plasma, HVOF, Flame spray powder. [Электронный ресурс]: (Довідник). Режим доступу: <http://www.mecpl.com>.
12. Chang-Jiu Li, Wen-Ya Li. Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition // Surface&Coatings Technology. — 2002. — 162. — P. 31—41.
13. Seo D., Ogawa K., Shoji T., Murata S. Effect of particle size range on thermally grown oxide scale formation on vacuum plasma sprayed CoNi- and CoCrAlY coatings. [Электронный ресурс]. Режим доступу: [http://asm.confex.com/data/manuscript/asm/itsc07/paper15657\\_manuscript\\_794\\_0.pdf](http://asm.confex.com/data/manuscript/asm/itsc07/paper15657_manuscript_794_0.pdf).
14. Симс Ч. Т., Столофф Н. С. Суперсплавы. Ч. 2. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
15. ГОСТ 123-92. Кобальт. Технические условия. — Введ. 1992.
16. ГОСТ 5909-2004. Хром металлический. — Введ. 2004.
17. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. — Введ. 2001.
18. ТУ 48-4-208-77. Иттрий металлический. — Введ. 1977.
19. ГОСТ 2169-69. Кремний технический. Технические условия. — Введ. 1969.
20. Порошки цветных металлов: (Справ.) / Под ред. С. С. Набойченко. — М.: Металлургия, 1997. — 540 с.

## Технология получения порошка сплава CoCrAlYSi

О. П. Василега, К. А. Гогаев, Н. И. Гречанюк,  
В. Г. Затовский

*Предложен новый метод получения порошка сплава CoCrAlYSi. Детально описаны его особенности и преимущества в сравнении с известными технологиями.*

**Ключевые слова:** порошок сплава CoCrAlYSi, измельчение, электронно-лучевой переплав.

## Technology of obtaining alloy powder CoCrAlYSi

O. P. Vasilega, K. A. Gogaev, N. I. Grechanyuk,  
V. G. Zatovskyi

*Proposed new method of obtaining alloy powder CoCrAlYSi. Detail described its peculiarity and advantages besides known technology.*

**Keyword:** alloy powder CoCrAlYSi, blending, electron-beam remelting.