

УДК 621.762

В.В.Пасічний, канд.техн.наук, С.О.Остапенко, А.А.Рогозинський, Г.О.Фролов, докт.техн.наук,  
В.С.Корчемна (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Київ)

### Термічна переробка відходів твердого сплаву ВК6М при нагріванні концентрованим випромінюванням

При нагріванні променистим потоком, що імітує концентроване сонячне випромінювання, в оптичній (дуговій) печі УРАН-1 отримані кінетичні характеристики процесу термічного перетворення в оксиди відходів сплаву ВК6М у вигляді деталі, що використовувалася раніше як матриця у процесі отримання штучних алмазів. Вивчено швидкості зменшення маси і лінійних розмірів деталі залежно від тривалості нагріву при періодичній зупинці для скобління оксидів із поверхні зразка. Проведено оцінку енергетичних витрат і ефективності процесу. Бібл. 6, рис. 4.

**Ключові слова:** енергозбереження, сонячна енергія, переробка відходів, оптична піч.

**Вступ.** Утилізація промислових відходів та енергозбереження – дві взаємно пов'язані проблеми сучасної науки та інженерії, над вирішенням яких працює велика кількість вчених і спеціалістів різних країн світу. Одним із напрямків пошукових робіт у цій тематиці є дослідження можливості використання концентрованої сонячної енергії для термічної переробки промислових відходів. З цією метою в Інституті проблем матеріалознавства (ІПМ) НАН України впродовж певного часу використовують високотемпературні геліоустановки – сонячні печі та їх імітатори – дугові оптичні печі. Найбільш поширеним об'єктом дослідження були сплави, що містять W, Mo, Ni, Cu, Co та інші цінні складові, продукти переробки яких у вигляді оксидів знаходять застосування в різних галузях промисловості.

В попередніх дослідженнях процесів термічного перетворення твердих та важких сплавів відмічалось, що кінетика руйнування матеріалу залежить у певній мірі не тільки від його хімічного складу, а й від габаритів та геометричних форм зразків, технології їх виготовлення та інших факторів [1–3].

**Мета роботи та об'єкт дослідження.** Мета даної роботи полягала у вивченні кінетики термічного перетворення деталі з твердого сплаву ВК6М, габарити якої утричі перевищували зону нагріву концентратора випромінювання. Деталь належала до оснащення процесу отримання надтвердих матеріалів (матриця), мала форму

диска діаметром 33,8 мм і товщиною 15,4 мм, з одного боку якого виготовлено осесиметричне поглиблення на 5,5 мм по центру з плавним виходом "на поверхню" на діаметрі 20 мм (рис. 1). Згідно з даними [4], хімічний склад сплаву ВК6М наступний: WC – 94%, Co – 6%.

**Методика та результати експериментів.** Методика термічної переробки зразка в даному підрозділі мало чим відрізнялася від раніше описаної [1–3, 5] для зразків інших габаритів та хімічного складу: окиснення без випаровування плюс періодичне скобління оксидів. Враховуючи розміри зразка, експерименти проводили з використанням оптичної печі УРАН-1, розмір робочої зони якої (фокальної плями концентратора променевого потоку) дорівнює 10-12 мм. Зразок розміщували в зоні нагріву на підкладці з плитки оптично прозорого кварцу.

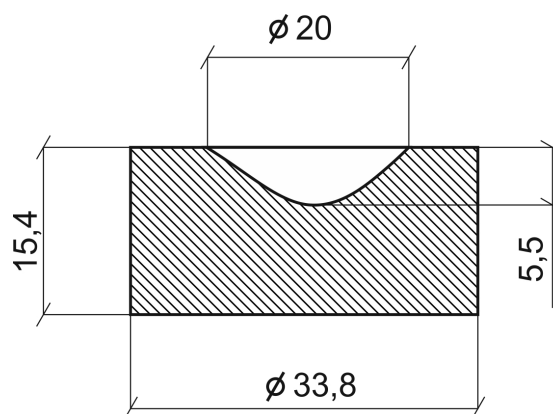
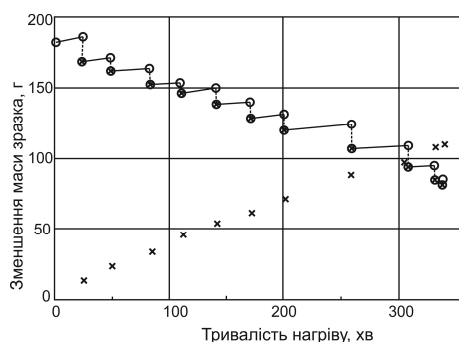


Рис. 1. Схема зразка відходів сплаву ВК6М.

Дослідження термічного перетворення твердих сплавів показали, що на початковому етапі нагріву процес окиснення зразка протікає досить активно, але при збільшенні тривалості нагріву внаслідок об'ємної невідповідності вихідних інгредієнтів сплаву продуктам їх окиснення змінюється конфігурація зразка з появою і зростанням тріщин, розшаруванням оксидів та екрануванням променевої енергії. Останній фактор після певного накопичення продуктів перетворення матеріалу починає зменшувати швидкість та ефективність процесу (ефект парасольки). Тож виникає потреба системного видалення оксидів із поверхні деталей, що піддається термічній обробці.

В даній роботі тривалість циклів нагріву зразка обмежувалась у середньому 30 хвилинами, після чого проводили примусове очищення поверхні зразка від оксидів скоблінням їх, маючи на увазі, що в разі реалізації технологічного процесу переробки відходів операція автоматичного очищення буде передбачена одним із відомих методів [1] (в іншому випадку процес може не витримати вимог економічності).

На рис. 2 наведені характеристики зменшення маси зразка після нагріву та накопичення маси оксидів у залежності від тривалості нагріву. Зменшення маси зразка показано у вигляді ступеневої залежності, де кожен ступінь відповідає в часі операції скобління – очищення зразка від оксидів і початку чергового циклу його нагріву. Результати вимірювань маси як зразка, так і оксидів додавалися послідовно у відповідності з тривалістю нагріву зразка, яка підсумовувалась.



**Рис. 2.** Зменшення маси зразка (о) та накопичення маси оксидів (х) у залежності від тривалості нагріву, яка послідовно підсумовується; ох – маса зразка після чергового скобління.

Звертає на себе увагу регулярне підвищення маси зразка за період кожного циклу від початку нагріву зразка до його охолодження перед черговим скоблінням за рахунок окиснення металічних складових сплаву. Дещо значиме збільшення маси зразка після першого циклу пояснюється вихідною "чистотою" поверхні сплаву на відміну від наступних циклів, коли ручне скобління не дозволяло зняти з поверхні зразка всі 100% оксидів.

Аналізуючи умовну криву зміни маси зразка, можна виділити три зони, де помітно змінюється швидкість процесу (нахил кривої). Перша зона – початкова (до 25-30 хв), у якій вихідний матеріал зразка більш активно окислювався з поверхні та ближчих до неї шарів, маючи майже вільний доступ повітряного кисню. Найбільш стабільною є зона між сумарними 50-60 та 200 хвилинами, де тривалість нагріву після скобління оксидів не перевищувала 30 хв (найчастіше цикли витримували в межах 25-30 хв). Швидкість зменшення маси зразка в цій зоні дорівнювала близько 0,27 г/хв. Дещо вище цей показник в останній зоні: матеріал зразка почав давати тріщини, що приводило до збільшення площі окислення і утворення оксидів.

Окремо слід зупинитись на температурному режимі процесу. Як було зазначено вище, методика переробки сплаву передбачала недопущення поверхневого плавлення оксидів, що обмежувало температуру зразка в робочій зоні. З іншого боку, ефективність процесу перетворення матеріалу потребує максимально допустимої температури.

В даному випадку вимірювання температури поверхні зразка в центрі його робочої зони (фокальної плями дзеркального концентратора) проводили за допомогою інфрачервоного швидкодійного пірометра IGA-100 IMPAC Electronic GMBH (Німеччина) та з використанням обтюраторного пристрою для короточасного затінення зразка в момент заміру (більш детальний опис методики є, наприклад, в [6]). Коефіцієнт чорноти задавали постійним – 0,8. Враховуючи, що розмір робочої зони установки УРАН-1 в межах потрібної температури дорівнює 10-12 мм, що в 3 рази менше розміру зразка, вважалось доцільним оцінити, хоча б грубо, розподіл температури за межами фокальної плями. Заміри проводили кон-

тактим способом за допомогою термопар типу ХА діаметром 0,2 мм при візуальному контролі недопущення можливого оплавлення в робочій зоні. Регулювання температури проводили шляхом зміни вольт-амперного режиму дугової лампи, що характерно для установки УРАН-1. Заміри температури проводили 2-3 рази впродовж кожного циклу нагріву в трьох точках: на краю верхньої і нижньої кромки перетину площин із циліндром та посередині циліндричної частини зразка (рис. 1).

Вимірювання температур дозволило зробити певне їх узагальнення. Так, пірометричні заміри в центрі променевого нагріву показали  $1080 \pm 30^\circ\text{C}$ . Термопарні заміри на "периферії" зразка показали наступне: а) верхня кромка –  $1050 \pm 30^\circ\text{C}$ ; б) середина циліндричної поверхні –  $1040 \pm 30^\circ\text{C}$ ; в) нижня кромка –  $1000 \pm 30^\circ\text{C}$ . Таким чином, можна зробити висновок, що завдяки досить високій теплопровідності сплаву ВК6М температура в об'ємі всього зразка допускала протікання окиснення матеріалу, зрозуміло, при наявності кисню. Це підтвердили очищення поверхні зразка від оксидів: їх наявність була навіть на донній поверхні, хоч у значно тоншому шарі, незважаючи на тісний контакт із кварцовою підкладкою.

Певний вплив на інтенсивність перетворення матеріалу може мати фактор "стартового" нагріву, тобто тривалість періоду виходу температури зразка від холодного до робочого (заданого) рівня. Однак чим довший період безперервного нагріву, тим менший вплив "старту", до того ж радіаційний нагрів може бути підведений миттєво (безінерційно). Порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що в даному випадку вплив тривалості "стартового" нагріву присутній постійно, оскільки кожному циклу нагріву передувало очищення поверхні зразка від оксидів, а вихід температури на робочий рівень тривав 3-5 хвилин при тривалості циклів від 25 до 60 хв. Іншими словами, в методиці дослідження присутня постійна величина, яку, можливо, слід враховувати при переносі результатів на інші умови.

На рис. 3 наведено залежність маси оксидів, що накопичувалась у результаті безперервного одноциклічного нагріву зразка та скобління його після охолодження. Тривалість циклів нагріву

була в межах від 7 до 60 хв. Отримана залежність демонструє досить чітку закономірність розміщення експериментальних точок. На погляд авторів роботи, це свідчить про те, що в межах обраної тривалості нагріву (до 60 хв) і температурного режиму протікав однотипний процес перетворення матеріалу зразка в оксиди.

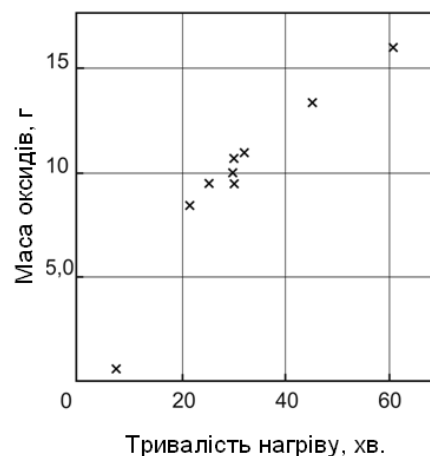


Рис. 3. Накопичення маси оксидів у залежності від тривалості одноциклового нагріву.

На рис. 4 показано кінетику зміни основних розмірів зразка – діаметра при вершині та товщини (висоти) після операції скобління.

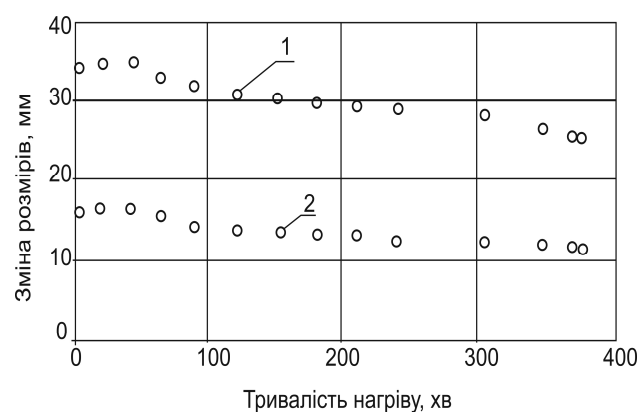


Рис. 4. Зміна розмірів зразка – діаметра (1) та товщини (2) в залежності від тривалості нагріву.

Видно, що в результаті перших двох циклів нагріву обидва розміри дещо збільшилися (у середньому на 0,6 мм) – як результат поглибленого проникнення кисню. Товщина шару оксидів, знятого з поверхні зразка після першого і другого циклів, була в межах 0,3-0,5 мм у залежності від

місця розташування. Застосування подальших циклів нагріву в межах від 100 до 300 хвилин показало досить рівномірне зменшення розмірів зразка та відповідне збільшення маси оксидів, що накопичувалась (рис. 2). При подальшому нарощуванні кількості циклів зменшення розмірів зразка прискорюється. Причиною цього, очевидно, є зменшення маси зразка після чергового скобління і його діаметра в порівнянні з вихідним розміром на 23% та завдяки цьому – наближення основної маси зразка до центра гарячої зони. Таким чином, сумарні 400 хвилин нагріву дозволили довести, що триразове збільшення діаметра деталі з твердого сплаву ВК6М відносно розміру зони нагріву не є пересторогою для здійснення процесу термічної переробки в оптичних та сонячних печах.

Зауважимо, що при термічній переробці твердих сплавів відбувається два взаємно протилежних із точки зору збереження маси процеси: видалення в газовій фазі двоокису вуглецю, що зменшує кінцеву масу, та накопичення твердих оксидів металу, маса яких складає корисний залишок процесу і характеризує його ефективність. Як показав рентгенофазовий аналіз, основними продуктами термічної переробки твердого сплаву типу ВК6М є оксиди вольфраму  $\text{WO}_3$  і  $\text{WO}_{2,9}$  та вольфрамат кобальту  $\text{CoWO}_4$  такої структури:

- $\text{WO}_3$  – кристалічна ґратка триклінна з періодами:  $a = 7,30\text{Å}$ ,  $b = 7,52\text{Å}$ ,  $c = 7,69\text{Å}$ ;
- $\text{WO}_{2,9}$  – ґратка тетрагональна,  $a = 5,30\text{Å}$ ,  $c = 3,83\text{Å}$ ;
- $\text{CoWO}_4$  – ґратка моноклінна,  $a = 4,67\text{Å}$ ,  $b = 5,69\text{Å}$ ,  $c = 4,95\text{Å}$ ,  $\beta = 90^\circ$ .

**Аналіз ефективності процесу.** Оскільки переробка відходів від початку націлена на промислово-комерційний характер процесу, доцільно оцінити його ефективність. Важливими характеристиками процесу перетворення матеріалу є питомі енерговитрати на отримання корисних продуктів  $H_{\text{окс}}$  та винос матеріалу (зменшення маси об'єкта)  $H_{\text{мас}}$ . Для визначення цих величин були проведені калориметричні виміри потужності концентрованого випромінювання за допомогою приладу ТПІ-2М, що використовується у практиці лазерних технологій. Оскільки такі характеристики теплових процесів

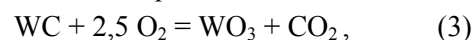
залежать від значної кількості супроводжуючих факторів, то подальше практичне їх використання може носити більше орієнтовне значення. Розрахунки проводили за формулами (1) та (2), обравши середні значення складових величин із використанням найбільш стабільної частини залежностей, наведених на рис. 2, що відповідають показникам між 100 і 200 хвилинами тривалості нагріву:

$$H_{\text{окс}} = N_e / V_{\text{окс}}, \quad (1)$$

$$H_{\text{мас}} = N_e / V_{\text{мас}}, \quad (2)$$

де  $N_e = 0,45$  кВт – середня потужність випромінювання;  $V_{\text{окс}} = 0,3$  г/хв – швидкість накопичення продуктів термічного перетворення матеріалу;  $V_{\text{мас}} = 0,32$  г/хв – швидкість зменшення (виносу) маси зразка. Підставляючи цифрові значення у формули (1) і (2) та узгоджуючи розмірності величин, отримали такі значення питомих затрат:  $H_{\text{окс}} = 90$  кДж/кг;  $H_{\text{мас}} = 84,4$  кДж/кг.

Серед характеристик ефективності процесу можуть бути коефіцієнти виходу корисних продуктів та їх втрати. Чисельно перший із них дорівнює відношенню суми отриманих продуктів переробки до теоретично можливої величини. Різниця між ними буде характеризувати втрати. Для визначення цих коефіцієнтів потрібно знати матеріальний баланс хімічних процесів, що протікають. Виходячи з цього, окиснення сплаву можна умовно представити двома реакціями, які в сумі охоплюють весь процес:



Враховуючи, що сплав ВК6М складається з 94%WC і 6%Co (по масі) [4], знаходимо теоретично можливі вихідні значення маси карбиду вольфраму  $G_{\text{WC}}$  і кобальту  $G_{\text{Co}}$ , які можуть взяти участь у реакціях:  $G_{\text{WC}} = 0,94 G_0$  г і  $G_{\text{Co}} = 0,06 G_0$ , де  $G_0$  – вихідна маса зразка, підданого повній (без залишку) термічній переробці. В даному випадку за  $G_0$  приймається різниця між вихідною масою зразка та його залишком після останнього циклу нагріву і скобління, тобто маса матеріалу, втрачена зразком внаслідок термічної обробки. Використовуючи відомий прийом пропорцій та реакції (3) і (4), знаходимо вирази для визначення

теоретично можливої маси одержуваних оксидів вольфраму  $G_{\text{WO}_3}$  і  $G_{\text{CoO}}$ :

$$G_{\text{WO}_3} = G_{\text{WC}} \cdot M_{\text{WO}_3} / M_{\text{WC}} = 0,94 G_0 M_{\text{WO}_3} / M_{\text{WC}}, \quad (5)$$

$$G_{\text{CoO}} = G_{\text{Co}} \cdot M_{\text{CoO}} / M_{\text{Co}} = 0,06 G_0 M_{\text{CoO}} / M_{\text{Co}}, \quad (6)$$

де буквою  $M$  позначені молекулярні маси хімічних сполук відповідних індексів. Підставляючи їх числові значення з таблиці Менделєєва, а також замінюючи цифри 0,94 і 0,06 на коефіцієнти  $A_{\text{WC}}$  і  $A_{\text{Co}}$ , відповідні хімічному складу зразка матеріалу і, нарешті, підсумовуючи вирази (3) і (4), отримуємо вираз для оцінки теоретично можливої сумарної маси продукту  $G_{\text{теор}}$  як результат термічної переробки відходів твердого сплаву типу ВК6М:

$$G_{\text{теор}} = G_{\text{WO}_3} + G_{\text{CoO}} = G_0 (1,18 A_{\text{WC}} + 1,27 A_{\text{Co}}). \quad (7)$$

Використовуючи вираз (7) і знаючи величину початкової маси даного зразка сплаву ВК6М ( $G_0 = 111,48$  г), було отримано таке значення:  $G_{\text{теор}} = 132,1484$  г. При отриманій експериментально сумарній масі оксидів  $G_{\text{експ}} = 107,74$  г коефіцієнт корисного виходу продуктів переробки  $\xi_{\text{квп}} = G_{\text{експ}} / G_{\text{теор}}$  був обчислений як 81,53%. Відповідно втрати склали 19,47%. Вони могли бути викликані селективним випаровуванням  $\text{WO}_3$ , не затриманим технічними засобами, що були застосовані, а також втратами при зважуванні та інших операціях.

Даний підхід дозволяє, очевидно, запропонувати узагальнену формулу для визначення теоретично можливого виходу продуктів і ефективності переробки сплавів більш складного складу, але досить близьких за характером і механізмом термічного перетворення:

$$G_{\text{теор}} = G_0 \sum A_i M_{\text{MeO}_i} / M_{\text{Me}_i}, \quad (8)$$

де  $A_i$  – частка  $i$ -го металу в складі матеріалу;  $M_{\text{Me}_i}$  – молекулярна маса  $i$ -го металу;  $M_{\text{MeO}_i}$  – молекулярна маса оксиду  $i$ -го металу.

**Висновки.** Підсумовуючи результати проведеної роботи, можна сказати наступне. Сплав ВК6М, як представник групи твердих вольфрам-кобальтових сплавів, за механізмом термічного перетворення під дією концентрованого випромінювання, що імітує сонячний нагрів, не проявив принципових відмінностей від поведінки інших сплавів цієї групи, в достатній

мірі близьких за хімічним складом. Доведено, що триразове перевищення габаритних розмірів об'єкта нагріву відносно "гарячої" (робочої) зони при досить високій теплопровідності матеріалу не є пересторогою для успішної його термічної переробки. Отримані кількісні кінетичні та енергетичні дані відносно перетворення матеріалу під дією концентрованого випромінювання, що імітує сонячну енергію, на погляд авторів роботи, можуть служити орієнтиром для проектування економічно виправданого технологічного процесу з використанням сонячних печей.

*Примітка.* Рентгенографічний аналіз було виконано науковим співробітником Рогозинською А.О., за що автори висловлюють їй щире подяку.

1. Пасичный В.В., Остапенко С.А., Рогозинский А.А. Особенности переработки отходов мелких деталей из сплава ВК-8 при концентрированном лучистом нагреве // Сб. Современные проблемы физич. материаловедения. Вып. 21. – Труды ИПМ НАН Украины. Серия "Физико-химические основы технологии порошковых материалов". – Киев : ИПМ НАН Украины. – 2012. – С. 164–170.
2. Пасичный В.В. Особенности термической переробки в сонячній печі відходів із важкого сплаву "великих" розмірів. // Відновлювана енергетика. – 2013. – № 2. – С. 45–48.
3. Пасичный В.В. О термической переработке отходов твёрдого сплава ВК8 при нагреве концентрированным солнечным излучением // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 10. – С. 33–37.
4. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе // М.: Металлургия, 1989. – 368 с.
5. Пасичный В.В., Остапенко С.А. Термическая переработка в оптической печи отходов твёрдого сплава ВН10. // Сб. Современные проблемы физич. материаловедения. Вып. 22. – Труды ИПМ НАН Украины. Серия "Физико-химические основы технологии порошковых материалов". – Киев: ИПМ НАН Украины. – 2013. – С. 50–55.
6. Пасичный В.В., Паничкина В.В., Радченко П.Я., Остапенко С.А., Гетьман О.И. Методика определения термостойкости керамики с использованием лучистого нагрева // Проблемы прочности. – 2012. – № 4. – С. 79–87.

## REFERENCES

1. Pasichnyy V.V., Ostapenko S.A., Rogozinskiy A.A. Features of recycling ВК-8 alloy small parts at concentrated radiant heating // Collection. Modern problems of physical material studying. Issue. 21. – Trudy IPM NAN Ukrainy. Seriya "Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii poroshkovykh materialov" – Kyiv: IPM NAN Ukrainy. – 2012. – Pp. 164–170. (Rus)

2. Pasichnyi V.V. Features of thermal processing of waste of hard alloy "large" size in a solar furnace // Vidnovliuvana enerhetika. – 2013. – № 2. – Pp. 45–48. (Ukr)

3. Pasichnyi V.V. About thermal waste carbide BK8 when heated by concentrated solar radiation // Alternative Energy and Ecology. – 2013. – № 10. – Pp. 33–37. (Rus)

4. Andrievskiy R.A., Spivak I.I. The strength of refractory compounds and materials based on them. – M.: Metallurgiya, 1989. – 368 p. (Rus)

5. Pasichnyi V.V., Ostapenko S.A. Thermal processing of hard alloy waste in an optical furnace HV 10. // Collection Modern problems of physical material studying. Issue. 22. – Trudy IPM NAN Ukrainy. Seriya "Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii poroshkovykh materialov". – Kiev: IPM NAN Ukrainy. – 2013. – Pp. 50–55. (Rus)

6. Pasichnyi V.V., Panichkina V.V., Radchenko P.Ya., Ostapenko S.A., Getman O.I. Method for determining heat resistance of ceramics with the use of radiant heat // Problemy prochnosti. – 2012. – № 4. – Pp. 79–87. (Rus)

**В.В.Пасечный**, канд.техн.наук, **С.О.Остапенко**, **А.А.Рогозинский**, **Г.О.Фролов**, докт.техн.наук, **В.С.Корчемная** (Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины, Киев)

#### **Термическая переработка отходов твердого сплава ВК6М при нагреве концентрированным излучением**

*При нагреве лучистым потоком, имитирующим концентрированное солнечное излучение, в оптической (дуговой) печи УРАН-1 получены кинетические характеристики процесса термического превращения в оксиды отходов сплава ВК6М в виде детали, использовавшейся ранее в качестве матрицы в процессе получения искусственных алмазов. Изучены скорости уменьшения массы и линейных размеров детали в зависимости от длительности нагрева при периодической остановке процесса для соскабливания оксидов с поверхности образца. Проведена оценка энергетических затрат и эффективности процесса. Библ. 6, рис. 4.*

**Ключевые слова:** энергосбережение, солнечная энергия, переработка отходов, оптическая печь.

**Pasichnyi V.V., Ostapenko S.O., Rohozynskiy A.A., Frolov H.O., Korchemna V.S.** (Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, Kyiv)

#### **Thermal recycling VK6M hard alloy wastes when heating by concentrated radiation**

When heated by radiant flux simulating concentrated solar radiation in an optical (arc) furnace URANIUM-1 there were obtained kinetic characteristics of the process of thermal

conversion of oxides wastes of VK6M alloy into the form of an element previously used as a template when producing artificial diamonds. There were studied rates of weight decrease and linear dimensions of the element depending on the duration of the heating process when the process was recurrently stopped for scraping oxides off the sample surface. The estimation of energy costs and process efficiency were done. References 6, figures 4.

**Keywords:** energy saving, solar energy, wastes recycling, optical furnace.

#### **SYNOPSIS**

Problem of energy and resource safety is actual and scientists and specialists in many countries are presently busy at the decision of it. Processing of industrial wastes with the use of the concentrated solar energy is one of directions of the problem decision. Wastes of BK6M alloy were the detail which used before as a matrix in the process of receipt of artificial diamonds. It was exposed for thermal transformation by the radiant flux heating, imitating the concentrated solar radiation, in the optical (arc) furnace of URAN-1. The feature of experiments methodology consisted of that heating of sample was periodically stopped and after cooling scraped off mechanically from his surface layer of oxides, that screens the radiant flux.

It is assumed that in case of commercial realization of process the automatic purging will be organized from oxides, for example, by the method of mutual friction of details at the rotation of them in crucible.

The temperature of the sample was controlled with a help of IR pyrometer in the center of working zone (focal spot) and supported on the level of  $1080 \pm 30^\circ\text{C}$ , shutting out a visible melting and evaporation of oxides appearing on a surface.

Kinetic descriptions of process of thermal transformation of material in oxides are got as dependences of decrease of speed of mass and of linear sizes of detail on duration of heating in case of periodic stopping of process for scraping off of oxides from the surface of the sample. The estimation of power expenses and efficiency of process is conducted. So, the specific expenses of energy on the decrease of sample average  $H_{\text{мас}} = 84,4 \text{ kJ/kg}$ , on the receipt of the processing product (oxides) of  $H_{\text{окс}} = 90 \text{ kJ/kg}$ .

The estimation of coefficient of efficiency of process  $\xi_{\text{квп}}$  is offered as attitude of amount of the actually got product of material processing toward in theory possible. In this case appeared  $\xi_{\text{квп}} = 81,53 \%$ , accordingly losses (shortage of product) were  $19,47 \%$ . Size of losses testifies to the necessity of perfection of experiment methodology.

Obtained quantitative kinetic and power data relatively transformation of material under the action of the concentrated radiation, in opinion of authors of work, can serve as a reference-point for planning of the economically justified technological process with the use of solar furnaces.

Стаття надійшла до редакції 18.01.16

Остаточна версія 20.04.16