

Винахід відноситься до способів високотемпературної обробки (графітації) випалених заготовок із вуглецевих матеріалів у багатотонажних електричних печах опору при температурі понад 3000°C та може бути використаний при графітації електродів для електротермічних та електрохімічних процесів.

Найбільш близьким по технічній суті та досягаемому результату до винаходу, що пропонується, є спосіб графітації вуглецевих матеріалів (див. а.с. СРСР № 656966 від 20.11.75, опубл. 15.04.79, М.Кл.<sup>2</sup> СО1В 31/04), який включає подачу електроенергії для попереднього нагріву керна, наступну дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії з паузами між ними, завершальну непереривну подачу електроенергії та відключення печі.

Попередній нагрів керна здійснюють до температури 1500 – 2100°C, після чого переходять на дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії в кількості від 1 до 3 імпульсів з паузами між ними 1 – 3 години. При подачі одиночних імпульсів швидкість нагріву становить 80 – 120°C/год. При температурі керна 2100°C переходять на безперервну подачу електроенергії із швидкістю 10 – 50°C/год, і при температурі 2700°C піч відключають.

Відомий спосіб не забезпечує можливості проведення процесу графітації при оптимальному температурному градієнті по перерізу керна між пересилкою та вихідними заготовками, що приводить до одержування великої кількості виробів з нестабільними фізико-механічними характеристиками і до високих питомих затрат електроенергії.

Це обумовлюється тим, що процес графітації некерований. Тривалість подачі одиночних імпульсів та пауз між ними установлюють довільно, без контролю за температурою пересилки та заготовок, тобто без урахування температурного градієнта по перерізу керна. Крім того, дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії здійснюють у дуже вузькому інтервалі температури нагріву – 1500 – 2000°C. До 1500°C нагрів здійснюють при безперервній подачі електроенергії, що стає причиною виникнення великого температурного градієнта по перерізу керна між пересилкою та заготовками. Нерівномірне температурне поле по перерізу заготовки приводить до виникнення тріщин у ній. Поверхневі шари заготовок при непереривній подачі електроенергії для нагріву до такої високої температури перегріваються, тоді як внутрішні шари нагріваються значно повільніше, що і викликає виникнення тріщин та отримання виробів з нестабільними фізико-механічними характеристиками. Не сприяє істотному вирівнюванню температурного градієнта по перерізу керна і перехід на дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії, бо різниця між температурами пересилки та заготовок велика, а інтервал температур, при яких здійснюють дискретну подачу імпульсів, невеликий. У якійсь мірі досягається вирівнювання температури по загальному керну при завершальній непереривній подачі електроенергії завдяки дуже низькій швидкості нагріву керна – 10 – 50°C/год. Це дуже тривалий процес, який займає від 12 до 60 годин і потребує високих затрат електроенергії. Піч відключають при температурі 2700°C, яка недостатня для завершення процесу графітації деяких вуглецевих заготовок, наприклад електродів.

В основу винаходу покладено удосконалення способу управління процесом графітації випалених вуглецевих заготовок у електричних печах опору, у якому шляхом введення нових операцій та режимів їх виконання забезпечується можливість проведення процесу графітації при оптимальному температурному градієнті по перерізу керна між пересилкою та вихідними заготовками, за рахунок чого підвищується якість готових виробів, які мають стабільні фізико-механічні характеристики, та знижуються питомі затрати електроенергії.

Поставлене завдання вирішується тим, що у способі управління процесом графітації випалених вуглецевих заготовок в електричних печах опору, який включає подачу електроенергії для попереднього нагріву керна, наступну дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії з паузами між ними, завершальну непереривну подачу електроенергії та відключення печі, відповідно до винаходу, новим є те, що на всіх стадіях подачі електроенергії здійснюють контроль за середньою температурою керна, попередній нагрів здійснюють до температури керна 120– 130°C, кожний одиночний імпульс подають на протязі 3 – 5 годин з підвищенням при цьому температури керна на 400 – 700°C, а тривалість пауз коректують у залежності від ступеня вирівнювання температури по об'єму керна, при температурі керна 2250 – 2350°C переходять на непереривну подачу електроенергії до екстремуму потужності, споживаної піччю, яку відключають після витримки заготовок при максимальній температурі на протязі 3,5 – 4,0 годин.

Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю суттєвих ознак винаходу, що заявляється, та технічним результатом, що досягається, полягає у тому, що введення нових операцій та режимів їх виконання,

- здійснення контролю за середньою температурою керна на всіх стадіях подачі електроенергії;
- попередній нагрів керна до температури 120 – 130°C;
- подача кожного одиночного імпульсу електроенергії на протязі 3 – 5 годин;
- підвищення температури керна на протязі кожного одиночного імпульсу на 400 – 700°C;
- коректування пауз у залежності від ступеня вирівнювання температури по об'єму керна;
- перехід при температурі керна 2250 – 2350°C на непереривну подачу електроенергії до екстремуму потужності, споживаної піччю;

- відключення печі після витримки заготовок при максимальній температурі на протязі 3,5 – 4,0 годин, у сукупності з відомими ознаками забезпечують можливість проведення процесу графітації при оптимальному температурному градієнті по перерізу керна між пересилкою та заготовками, за рахунок чого підвищується якість готових виробів і таким чином, збільшується вихід придатного продукту із стабільними фізико-механічними характеристиками, а також знижуються питомі затрати електроенергії.

Можливість проведення процесу графітації при оптимальному температурному градієнті по перерізу керна забезпечується за рахунок управління у функціях температури та часу змінюванням електро- та теплофізичних характеристик вуглецевих заготовок та матеріалу пересипки. Керн печі складається із послідовно з'єднаних електричних опорів пересипки з дуже високим опором та вуглецевих заготовок з відносно низьким опором. При однаковій силі струму, який протікає через керн, кількість тепла, що виділяється у пересипці та у заготовках, буде пропорційним їх опорам. Велика кількість тепла, а, отже, і електроенергії витрачається на початковий нагрів керна до температури 120 – 130°C, коли відбувається процес сушки пересилки та всього керна печі. І тільки у цей період подачу електроенергії можна здійснювати непереривно, тому що не відбувається різкий поверхневий нагрів вуглецевих заготовок.

Після завершення сушки, пересилки та всього керна подальша непереривна подача електроенергії і, отже,

підвищення температури керна може привести до нерівномірного прогріву вуглецевих заготовок з великим перепадом температур у їх різних частинах. Це викличе виникнення сильних напружень та розтріскування виробів. Щоб уникнути цього, подальшу подачу електроенергії здійснюють дискретно одиночними імпульсами. Тривалість кожного одиночного імпульсу становить 3 – 5 годин, а середня температура керна за цей час підвищується на 400 – 700°C. При такому режимі нагріву температурний градієнт по перерізу керна між пересилкою і заготовками не досягає критичного значення, при якому могли б виникнути умови для розтріскування вуглецевих заготовок. Під час паузи між попереднім та наступним одиночними імпульсами відбувається вирівнювання температури по об'єму керна за рахунок перерозподілу тепла між пересилкою, яка має більш високу температуру, та вуглецевими заготовками, які мають нижчу температуру. Перерозподіл тепла відбувається і по перерізу заготовки – від її поверхні до середини. Теплопровідність вуглецевих заготовок досить низька, тому дуже важливо, щоб тривалість пауз була достатньою для вирівнювання температури як по перерізу заготовки, так і по усьому об'єму керна. Наступний одиночний імпульс подають після установаження за результатами вимірювання середньої температури керна того, що досягнутий достатній ступінь вирівнювання температури. При такому чергуванні одиночних імпульсів електроенергії та пауз між ними температуру керна доводять до 2250 – 2350°C. При цій температурі вуглецеві заготовки і матеріал пересипки набувають електро- та теплофізичних характеристик, які дозволяють здійснювати подальшу непереривну подачу електроенергії до екстремуму потужності, споживаної піччю. Це пояснюється тим, що у процесі графітації способом за винаходом відбувається кероване у функціях температури та часу зміння теплопровідності та опору матеріалів пересипки та вуглецевих заготовок. При початковій теплопровідності пересипки 0,1 і заготовок 6,5Вт/м<sup>2</sup> °C до закінчення дискретної подачі одиночних імпульсів електроенергії величина теплопровідності досягає 4,5 і 13Вт/м<sup>2</sup> °C, відповідно. Опір пересипки змінюється від 19,845 до 0,97Ом, а заготовок – від 0,155 до 0,03Ом. При такому скороченні розкиду у електро- та теплофізичних характеристиках матеріалів пересипки і вуглецевих заготовок створюються умови для форсування режиму подачі електроенергії для доведення температури керна до кінцевого значення. Електроенергія, що непереривно подається до печі на завершальному етапі, поступово зростає до деякого максимуму, який є екстремумом потужності, споживаної піччю, або критичною точкою. В усіх випадках після цієї точки електроенергія, яку подають до печі, зменшується із зменшенням активного опору печі. У цей період зберігається гранична сила струму, допустима для обладнання, але активна потужність зменшується разом з коефіцієнтом потужності. При такому робочому режимі печі заготовки витримують на протязі 3,5 – 4,0 годин. У процесі витримки при максимальній температурі («3200°C) температурний градієнт по перерізу керна між пересилкою і вуглецевими заготовками досягає мінімального значення, відбувається вирівнювання температурного поля по перерізу заготовки, що забезпечує стабілізацію фізико-механічних характеристик та підвищення виходу придатних заготовок. При використанні способу за винаходом за рахунок забезпечення проведення процесу при оптимальному температурному градієнті суттєво знижуються питомі затрати електроенергії на одиницю готової продукції. Це досягається завдяки тому, що на кожному етапі нагріву подається задана кількість електроенергії для керованого зміння у функціях температури та часу електро- і теплофізичних характеристик вуглецевих заготовок та матеріалу пересипки, а саме їх теплопровідності та опору. Така подача електроенергії з одночасним контролем за середньою температурою керна і в процесі подачі, і під час пауз, забезпечує отримання готових виробів практично без браку, що також обумовлює суттєве зниження питомих затрат електроенергії. При здійсненні способу за винаходом електроенергія на керн печі не подається на протязі 18 – 21 години, тоді як способом, вибраним як прототип, передбачає, що електроенергія не подається на протязі 1 – 9 годин, чого явно недостатньо для вирівнювання температурного поля по перерізу заготовок і проведення процесу при оптимальному температурному градієнті.

Спосіб за винаходом здійснюють таким чином.

У середині печі графітації типу Ачесона у шарі пересипки між струмопідвідними електродами укладають випалені вуглецеві заготовки, зокрема електроди. Проміжки між графітуєними електродами заповнюють пересилкою - подрібненим металургійним коксом. Пересилкою заповнюють не тільки проміжки між графітованими електродами, але й оточують її шаром увесь керн. Загрузка керна печі вихідними заготовками та матеріалами пересипки і теплоізоляційної шахти строго нормується значеннями питомого електричного опору, теплопровідності та пористості, які мають стабільні значення від процесу до процесу. Після закінчення процесу формування керна печі за допомогою струмопідвідних електродів подають електроенергію для попереднього нагріву керна до температури 120 – 130°C. На цій стадії відбувається сушка пересипки та всього керна печі. Після закінчення сушки здійснюють дискретну подачу одиночних імпульсів електроенергії з паузами між ними. Тривалість кожного імпульсу становить 3 – 5 годин, а їх кількість – не менш чотирьох. Температуру керна у процесі подачі кожного імпульсу підвищують на 400 – 700°C і корегують тривалість пауз між імпульсами у залежності від ступеня вирівнювання температури по общему керна. При температурі керна 2250 – 2350°C переходять на непереривну подачу електроенергії до екстремуму потужності, споживаної піччю. У процесі непереривної подачі електроенергії керн нагрівається до максимальної температури 3150 – 3250°C. При такому робочому режимі печі заготовки витримують на протязі 3,5 – 4,0 годин, після чого піч відключають і переводять у режим невимушеного охолодження. На усіх стадіях графітації здійснюють контроль за середньою температурою керна.

Способом за винаходом було отримано у лабораторних умовах 10 партій графітованих електродів. У лабораторну установку завантажували 46,2кг зменшених випалених зразків електродів. У процесі графітації визначали затрати електроенергії, які потім були перераховані на промислову піч, призначену для графітації 46,2т вуглецевих електродів.

Для проведення порівняльних випробувань було одержано 6 партій електродів, при графітації яких управління процесом проводилось з порушенням режимів, що пропонуються заявляємим винаходом (партії № 11-16). Була одержана також одна партія електродів, графітацію яких здійснювали способом, відомим із прототипу (партія № 17).

Електроди, одержані у всіх 17 партіях, піддавали випробуванням на механічну міцність, теплопровідність, визначали їх питомий електричний опір, питому теплоємність при температурі 40 – 90° С, температурний

коефіцієнт розширювання. По даним цих випробувань судили про стабільність фізико-механічних характеристик електродів та визначали процент виходу придатних виробів і питомі затрати електроенергії на 1т електродів.

Режими, при яких проводилась графітація електродів, а також відомості про вихід придатних виробів і питомих затратах електроенергії приведені у таблиці.

Із таблиці видно, що самий високий процент виходу придатних виробів і самі низькі затрати електроенергії були при одержанні електродів партії №6, що свідчить про те, що при управлінні процесом забезпечувався оптимальний температурний градієнт по перерізу керна між пересилкою і заготовками. Достатньо високі показники були одержані при проведенні графітації решти партій електродів способом за винаходом.

Суттєво гірші показники одержані при графітації партій №11 – 16 та партії №17, графітацію якої здійснювали способом, відомим із прототипу.

Із таблиці видно, що при використанні способу управління процесом графітації випалених вуглецевих заготовок економія електроенергії становить приблизно 27%.

Таблиця

1.	120	3	700	2250	3200	3,5	98,3	3697,1
2.	125	3	700	2250	3150	4,0	98,7	3583,4
3.	130	3	700	2250	3170	4,0	98,5	3621,7
4.	125	4	600	2250	3200	4,0	98,8	3538,8
5.	125	5	500	2250	3250	3,5	98,5	3592,0
6.	125	4	650	2350	3190	4,0	95-5	3476,2
7.	125	5	400	2300	3200	3,5	99,2	3485,4
8.	125	4	500	2300	3150	4,0	99,1	3480,5
9.	125	3	400	2350	3250	3,5	98,9	3574,3
10.	125	3	500	2300	3200	4,0	99,0	3512,8
11.	110	2,5	800	2200	3200	3,0	85,4	4518,7
12.	135	5,5	350	2400	3150	5,0	96,2	4290,4
13.	110	4	750	2150	3200	4,5	88,7	4456,2
14.	135	4	350	2450	3250	3,5	97,4	4337,9
15.	125	2,5	600	2200	3150	4,0.	98,1	4407,6
16.	125	5,5	500	2450	3200	3,0	98,0	4469,2
17*	1500	3	300	2100	3200	—	82,7	4761,9

\* — по прототипу.