

**Пулинец И.В.**

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

## **Влияние технологических параметров процесса обжига на качество углеграфитовых заготовок**

С помощью экспериментальных исследований и численного анализа тепло-гидродинамического состояния камеры обжиговой печи исследовано влияние технологических параметров процесса обжига на качество углеграфитовой электродной продукции. Исследованы изменения схемы загрузки камеры печи, геометрии муфельных каналов и схемы пересыпки заготовок. Полученные результаты позволили разработать комплексные технические решения по уменьшению неравномерности температурного поля по заготовкам, что должно повысить качество углеграфитовых изделий.

**Ключевые слова:** обжиговая печь, схема загрузки, муфельные каналы, схема пересыпки, заготовка, температурное поле, математическая модель.

За допомогою експериментальних досліджень та чисельного аналізу тепло-гідродинамічного стану камери печі випалу досліджено вплив технологічних параметрів процесу випалювання на якість вуглеграфітової електродної продукції. Досліджено зміни схеми завантаження камери печі, геометрії муфельних каналів та схеми пересипки заготовок. Отримані результати дали змогу розробити комплексні технічні рішення щодо зменшення нерівномірності температурного поля по заготовках, що має підвищити якість вуглеграфітових виробів.

**Ключові слова:** піч випалу, схема завантаження, муфельні канали, схема пересипки, заготовка, температурне поле, математична модель.

Изделия из углеграфитовых материалов благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам находят все более широкое применение в таких отраслях промышленности, как металлургия, химия, нефтехимия, энергетика, машиностроение. В зависимости от способов термической обработки исходного углеграфитового материала и технологии производства могут быть получены изделия с заранее заданными свойствами.

Обжиг является одной из наиболее важных операций технологического цикла производства электродной продукции, в процессе которого происходит формирование физических свойств углеграфитовых материалов различного назначения. Обожженные материалы характеризуются устойчивостью к механическим воздействиям, повышенной теплопроводностью, электропроводностью и термостойкостью [1].

В мировой практике производства обожженной электродной продукции наиболее распространены многокамерные кольцевые печи типа Ридгаммера. Обжиг углеграфитовой продукции в этих печах представляет собой длительный (350–480 ч) многостадийный процесс, требующий существенных затрат энергии (3,9–

4,5 ГДж/т) [2]. Поэтому одной из важнейших и актуальных задач производства углеграфитовых изделий является разработка научно обоснованных технологических регламентов процесса обжига, которые обеспечивают заданное качество конечного продукта при уменьшении удельного расхода электроэнергии.

Основные технологические операции при производстве изделий из углеграфитовых материалов были разработаны и реализованы в промышленных масштабах в 80-х гг. XIX ст. Технология получения углеграфитовых электродных изделий осталась практически без изменений, но при этом применяются более современные оборудование, контрольно-измерительная и регулирующая аппаратура [3, 4].

В конструктивном плане за годы эксплуатации обжиговые печи типа Ридгаммера претерпели значительные изменения, основанные на результатах экспериментальных исследований, направленные в основном на уменьшение выхода бракованных изделий [2]. Применение такого метода исследования для получения данных о влиянии различных технологических параметров на тепло-гидродинамическое состояние обжиговых печей сопряжено со значительными

трудностями. К тому же этот метод не позволяет получить данные о влиянии изменения конструктивных особенностей печей и технологических параметров на скорость и равномерность нагрева заготовок [5].

Развитие средств вычислительной техники и программного обеспечения, включая численные методы реализации сложных математических моделей, позволяет получать достаточно точную и обширную информацию о тепло-гидродинамических процессах с помощью проведения численного анализа. При этом разработанные численные модели верифицируются на данные натуральных экспериментов, результаты которых также используются для задания граничных условий при проведении численных экспериментов.

Для определения рациональных тепловых режимов работы многокамерных печей обжига целесообразно экспериментальные исследования объединять с методами математического моделирования, что дает возможность существенно минимизировать материальные и временные ресурсы разработок.

Цель настоящей работы — исследование влияния технологических параметров процесса обжига на качество обжигаемых углеграфитовых изделий в многокамерных обжиговых печах.

### Физическая модель процесса обжига

Кольцевая обжиговая печь состоит из 20–30 или более камер, размещенных в 2 ряда ниже нулевой отметки корпуса цеха обжига. Каждая камера печи (рис.1) состоит из кассет 10, стенка и подина которых создают газовые каналы. В середину каждой кассеты, предварительно заполненной нижним слоем пересыпки 4, загружаются «зеленые» заготовки 8, сверху и между которыми также засыпается пересыпка. Сверху камера укрывается теплоизоляционным укрытием — сводом 1.

Движение дымовых газов через камеру печи от предыдущей к последующей осуществляется по газовому тракту через окна 6, огневые каналы 5, пространство под сводом 1, муфельные каналы 9, пространство между столбиками подины до входных окон следующей камеры. В процессе длительного обжига электродных заготовок одновременно задействована группа камер печи, состоящая из 6–10 ед. Причем первые две или одна камера по ходу движения газов находятся под огнем, а остальные камеры нагреваются за счет отходящих дымовых газов первой камеры, и таким образом осуществляется утилизация теплоты отходящих газов. Камеры в кольцевой печи при обжиге находятся

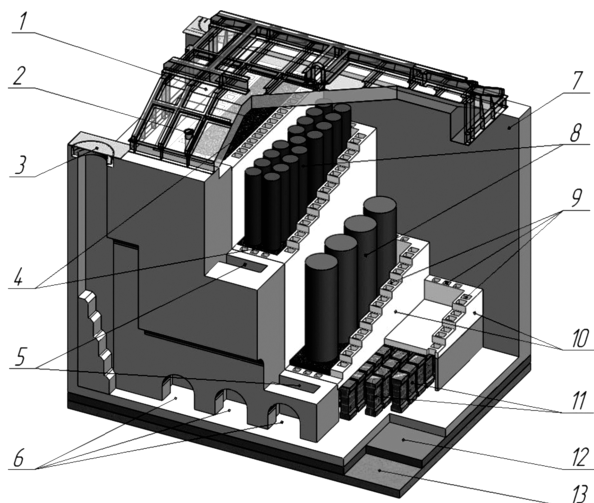


Рис.1. Камера обжиговой печи: 1 — свод; 2 — место установки горелок; 3 — канал для отвода дымовых газов; 4 — пересыпка; 5 — огневые каналы; 6 — окна входа дымовых газов из предыдущей камеры; 7 — огнеупорная футеровка камеры; 8 — углеграфитовые заготовки; 9 — муфельные каналы; 10 — кассеты; 11 — столбики подины кассеты; 12 — кирпичная кладка; 13 — бетон.

на разных стадиях процесса: когда на первой обжиг подходит к концу, то в последней он только начинается. По окончании обжига первая камера отключается от огня и от группы камер, задействованных в процессе, огонь переносится на следующую по ходу движения газов камеру, и к группе камер подключается новая камера, расположенная последней в группе.

С использованием разработанной математической модели тепло-гидродинамического состояния многокамерной обжиговой печи [6] проведен численный анализ действующей конструкции камеры обжиговой печи. Результаты расчетов полей температур в заготовках, выполненных с помощью программного комплекса OpenFOAM [7], согласуются с экспериментальными данными в пределах погрешности опытных данных [8]. Это обосновывает правомерность применения разработанной численной модели теплообмена и газодинамики камеры обжиговой печи для оценки влияния технических решений на ведение процесса обжига в многокамерных печах, в том числе изменение схемы загрузки камеры печи, геометрии муфельных каналов, схемы пересыпки заготовок.

### Влияние схемы загрузки камеры обжиговой печи

Анализ динамики нагрева заготовок в камере обжиговой печи показал, что основной проблемой исследованной кампании обжига является наличие большого перепада температуры по заготовкам, что можно объяснить интенсивным

подводом теплоты к заготовкам от огневых и торцевых газовых каналов [8].

Наиболее простым техническим решением уменьшения перепада температур по заготовкам в данном случае может являться применение комбинированной схемы загрузки, когда заготовки меньшего диаметра в центральных кассетах устанавливаются ближе к огневым колодцам, а в торцевых — ближе к противоположной стороне от огневого колодца (рис.2,а,б). Результаты численного анализа влияния этого технического решения на перепад температуры по заготовкам приведены на рис.2,в,г.

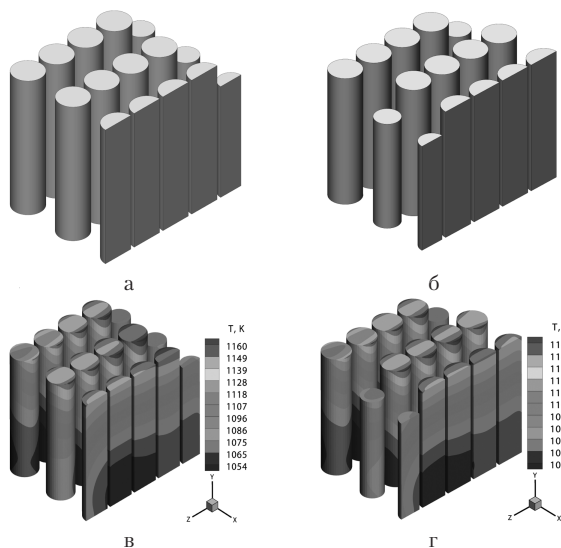


Рис.2. Влияние базовой (а) и комбинированной (б) схем загрузки камеры обжиговой печи и распределение температуры по заготовкам в этих схемах соответственно (в, г).

Анализ полученных температурных данных показал, что исследованная схема загрузки позволяет уменьшить перепад температуры в заготовках на 3,6 % (от 143,8 до 138,9 К) и увеличить минимальную температуру ряда заготовок большего диаметра на 50 К.

### Влияние теплоотдающей поверхности муфельных каналов

С целью уменьшения интенсивности подвода теплоты к заготовкам от огневых и торцевых газовых каналов и перепада температур в заготовках рассмотрена конструкция камеры печи обжига со всеми перекрытыми торцевыми каналами со стороны огневых колодцев и с двумя с противоположной стороны (рис.3,а,б). Результаты численного моделирования влияния частичного перекрытия торцевых муфельных каналов на распределение температуры в заготовках приведены на рис.3,в,г.

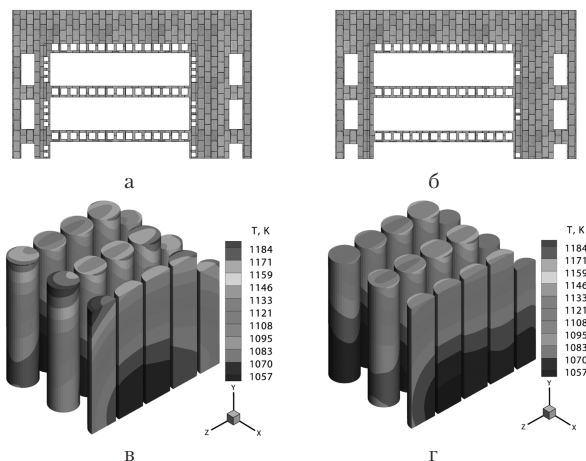


Рис.3. Влияние частичного перекрытия муфельных каналов камеры обжиговой печи на распределение температуры в заготовках: а, в и б, г — базовая конструкция и с частично перекрытыми торцевыми муфельными каналами соответственно.

Анализ полученных температурных данных показал, что неравномерность температуры по заготовкам на конец процесса обжига снизилась на 19,8 % (на 28 К — от 143,8 до 115,4 К) и минимальная температура заготовок осталась неизменной, а максимальная снизилась на 2,5 % (на 30 К).

Совместное использование частично перекрытых муфельных каналов и комбинированной схемы загрузки показало, что перепад температуры по заготовкам на конец кампании обжига уменьшился на 23,4 % (с 143,8 до 110,2 К) и минимальная температура заготовок практически не изменилась, а максимальная снизилась на 2,8 % (с 1188,5 до 1155,3 К).

### Влияние схемы пересыпки заготовок

С целью дальнейшего уменьшения перепада температуры по высоте заготовок было предложено использовать комбинированную схему пересыпки, заключающуюся в добавлении теплоизоляционного слоя древесных опилок толщиной 5 см сверху их торцов (рис.4).

Анализ результатов исследованной комбинированной схемы загрузки с использованием теплоизоляционного слоя древесных опилок показал, что перепад температуры по заготовкам уменьшился на 11,5 % (от 110,2 до 97,5 К) по сравнению с вариантом совместного использования частично перекрытых муфельных каналов и комбинированной схемы загрузки и на 32,2 % (от 143,8 до 97,5 К) по сравнению с вариантом без технических решений и минимальная температура заготовок практически не изменилась, а максимальная снизилась на 3,8 % (от 1188,5 до 1143 К) по сравнению с вариантом без технических решений.

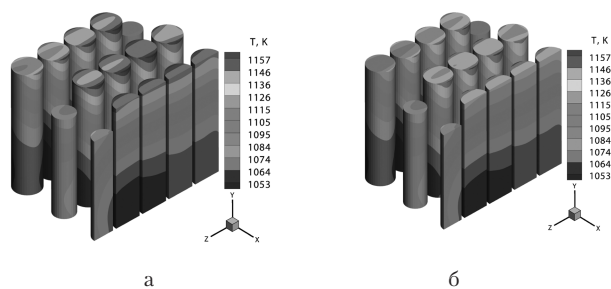


Рис.4. Влияние схемы загрузки заготовок на распределение температуры в заготовках без опилок (а) и с использованием теплоизоляционного слоя древесных опилок (б).

### Выводы

Проведен численный анализ влияния таких важных технологических параметров обжига, как схема загрузки, геометрия камеры печи и схема пересыпки на процесс обжига электродной продукции в многокамерных печах. Изменение схемы загрузки заготовок уменьшает перепад температуры по заготовкам в камере печи на 3,6 %.

Изменение теплоотдающей поверхности муфельных каналов за счет их частичного перекрытия по торцам кассет камеры печи приводит к уменьшению неравномерности поля температур по заготовкам на 19,8 %.

Использование теплоизоляционного слоя из древесных опилок в загрузке камеры обжиговой печи уменьшает перепад температуры в заготовках на 11,5 %.

Применение комплексного технического решения с изменением схемы загрузки, теплоотдающей поверхности муфельных каналов и использованием теплоизоляционного слоя из дре-

весных опилок снижает перепад температуры в заготовках на 32,2 %.

### Список литературы

1. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. и др. Производство электродной продукции. — М. : Metallurgy, 1985. — 128 с.
2. Чалых Е.Ф. Оборудование электродных заводов. — М. : Metallurgy, 1990. — 238 с.
3. Малахов С.А. Совершенствование технологи обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Владикавказ, 2004. — 30 с.
4. Селезнев А.Н., Шипков Н.Н. Электродное производство сегодня // Цв. металлы. — 1996. — № 12. — С. 48–49.
5. Шибалов С.Н. Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеграфитовых материалов : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2004. — 30 с.
6. Карвацкий А.Я., Пулінець І.В., Шилович І.Л. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок // Восточноевроп. журн. передовых технологий. — 2012. — № 1/4. — С. 33–37.
7. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. [Электронный ресурс]. — Дата доступа : март 2011 г. — Режим доступа : <http://www.openfoam.com/>.
8. Panov Ye.N., Kutuzov S.V., Karvatsky A.Ya. et al. Power saving at production of electrode products // XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, 7–9 Sept., 2011) : Proc. Intern. Congress. — Krasnoyarsk : Verso, 2011. — P. 412–423.

Поступила в редакцию 23.11.12

### *Pulinets I.V.*

*National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev*

## The Influence of Technological Baking Process Parameters on Quality of Carbon and Graphite Blanks

The influence of technological backing process parameters on the quality of backing process of carbon and graphite electrode production by experimental studies and numerical analysis of thermal and hydrodynamic status of baking furnace chamber is investigated. The fluctuating loading method of furnace chamber, muffle channels geometry and blanks scatter circuit are investigated. The obtained results allowed developing complex technical solutions for nonuniformity of blanks temperature field reduction which should improve the quality of carbon and graphite products.

**Key words:** baking furnace, loading circuit, muffle channels, scatter circuit, blank, temperature field, mathematical model.

Received November 23, 2012