

Гасик М. И. /д. т. н./, Гриншпунт А. Г. /д. т. н./  
НМетАУ

Куцин В. С. /д. т. н./, Лапин Е. В. /к. т. н./,  
Дедев Ю. Б. /к. т. н./  
Никопольский завод ферросплавов

## Исследование условий формирования самообжигающихся электродов печей Никопольского завода ферросплавов

Выявлены закономерности распределения температур и характер расположения агрегатных зон самообжигающихся электродов высокоомощных электропечей. Установлены и внедрены на ПАО «НЗФ» оптимальные режимы эксплуатации в период остановок печей, заключающиеся в обеспечении равномерного соотношения скоростей охлаждения центра и поверхности электрода, которые позволили сократить количество их обрывов, повысить производительность печей, снизить затраты электроэнергии и шихтовых материалов. Создана математическая модель расчета тепловых полей круглых и плоских самообжигающихся электродов применительно к различным типам, конструкциям и мощностям печей, видам выплаиваемых сплавов. Проведены исследования микроструктуры и физико-механических свойств образцов листового металла, нагреваемого до 1300 °С в окислительной и малоокислительной газовых средах, в контакте с электродной массой. Исследована технология наращивания кожухов электродов, рассмотрены условия и особенности формирования сварного шва при использовании различных марок стали, типов сварного шва и вида сварки, исследован и внедрен в условиях ПАО «НЗФ» способ полуавтоматической сварки кожухов самообжигающихся электродов сплошной и порошковой проволокой в среде углекислого газа. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** рудовосстановительная печь, самообжигающийся электрод, агрегатные зоны, режимы формирования, кожух электрода, физико-механические свойства

*Regularities of temperature distribution and character of location of aggregate areas of self-baking electrodes of high-powdered electric furnaces are revealed. Optimal operating regimes while furnace shutdown are set and implemented at «Nikopol Ferroalloys Plant», PJSC. They lie in providing of uniform speed ratio of cooling of center and electrode surface, which allowed to reduce the amount of their breaks, increase furnace capacity, reduce power and slag costs. Mathematical model of calculation of thermal fields of round and flat self-baking electrodes as applied to different types, constructions and capacities of furnaces, types of smelting is developed. Investigations of microstructure and physical and mechanical properties of sheet metal samples heated up to 1300 °C in the oxidative and low oxidative gas environment in the contact with anode paste are given. Technology of electrode shell growth is investigated, conditions and peculiarities of formation of welded seam during usage of various steel grades, types of welded seam and welding are considered, the way of semi-automatic welding of shells of self-baking electrodes by solid and flux-cored wire in the carbon dioxide medium is investigated and implemented in conditions of «Nikopol Ferroalloys Plant», PJSC.*

**Keywords:** ore-thermal furnace, self-baking electrode, aggregate areas, formation regimes, electrode shell, physical and mechanical properties

### Постановка задачи исследования

Создание оптимальных условий эксплуатации непрерывных самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей, характеризующихся сложностью и многообразием физико-химических процессов, происходящих при обжиге электродной массы, обуславливает острую необходимость изучения теплотехнических особенностей формирования электрода. В этой связи весьма важное значение приобретают сведения о распределении температур по высоте и сечению электрода, а также положении отдельных зон агрегатного состояния электродной массы, что позволяет выработать конкретные предложения исключающие обрывы

вы электродов по скокованной и нескокованной части [1].

### Методика эксперимента

Для исследования температурных полей самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей использовали один из наиболее надежных, хотя и трудоемкий, метод проходных термопар [1]. Хромель-алюмелевые термопары изолированные от внешней среды алундовой солодкой, помещали в предварительно установленные в электрод трубы диаметром 1 дюйм по схеме, приведенной на рис. 1. Рабочий конец термопары защищали алундовым колпаком длиной 60 мм. Это необходимо для предотвращения его науглероживания в

зоне высоких температур. К алундовому наколнику нихромовой проволокой прикрепляли груз. По мере наращивания электрода секции труб, равные высоте кожуха соединяли с помощью муфт. Сварные соединения труб не использовали, т. к. они затрудняют перемещение термопарной проволоки (рис. 1).

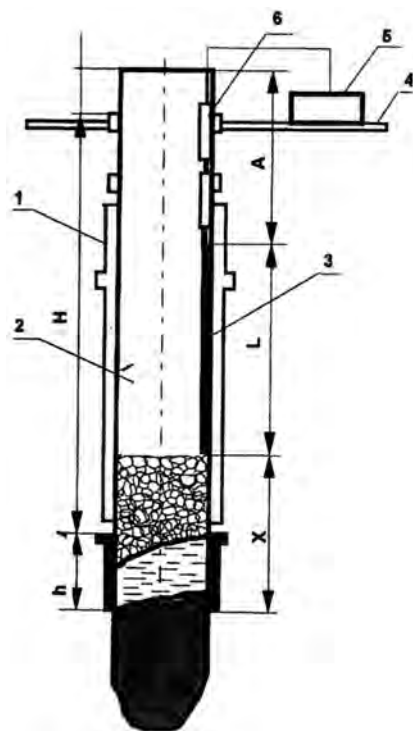


Рис. 1. Схема расположения термопар при исследовании температурных полей электродов:

- 1 - несущий цилиндр; 2 - электрод;
- 3 - труба с термопарой; 4 - электродная площадка;
- 5 - потенциометр; 6 - защитные уголки

Координаты точек, в которых производился замер температуры, определялись по формуле:  $X = (H + h + l) - (A + L)$ , где  $H$  - расстояние от нижней кромки нажимного кольца до верхней кромки контактных щек;  $h$  - высота контактной щетки;  $l$  - расстояние от верхней кромки кожуха до нижней кромки нажимного кольца;  $L$  - длина трубки;  $A$  - расстояние от верха трубы до верхней кромки кожуха. Термо ЭДС измеряли самопишущим электронным потенциометром КСП-06 при скорости диаграммной ленты 60 мм/ч. Замер температуры проводили при опускании и подъеме термозонда по высоте электрода с выдержкой в каждой измеряемой точке до установления равновесия, но не менее 10 мин. За начало отсчета принята нижняя кромка контактных щек. Исследования температурных зон проводили при дискретном изменении мощности в интервале 50-55 МВт и величине тока, равной в среднем 90-100 кА. Замеры тепловых полей проводили после работы печи на заданном электрическом режиме не менее 1 суток.

### Основные результаты исследований

Результаты исследований тепловых полей электродов печей РПЗ-63 Никопольского завода ферросплавов при выплавке ферросиликомарганца (а) и ферромарганца (б), работающих на мощности 52-55 МВт и токе электрода 95-100 кА приведены на рис. 2.

Сравнительный анализ распределения температурных зон и формы изотермических поверхностей в электроде печи РПЗ-63, выплавляющей ферромарганец с аналогичными данными для прямоугольных ферросиликомарганцевых печей РПЗ-63 (рис. 2) показывает, что основные закономерности распределения температурных полей в прямоугольных самообжигающихся электродах печей типа РПЗ-63 сохраняются вне зависимости от вида выплавляемого сплава, способа выплавки и мощности печи. Форма изотермических поверхностей, ограничивающих зоны плавления и коксования электродной массы имеет как выпуклый, так и вогнутый характер. Кривизна поверхности в продольном направлении (по большей оси) несколько больше, чем в поперечном. Выпуклый характер изотермической поверхности верхней зоны коксования, полученный при исследовании электродов ферромарганцевых печей, свидетельствует, что доля «джоулевого» тепла при коксовании электродной массы несколько меньше тепла, поступающего из ванны печи. Это объясняется сравнительно небольшим размером прямоугольных электродов по малой оси.

Изотермическая поверхность нижней части зоны коксования (изотерма 600 °С) имеет слегка выпуклый характер. Кроме того, температура центральной части электрода ниже зоны коксования увеличивается с большей скоростью, чем у периферии. По-видимому, в скокованном угольном блоке электрода на распределение температур в большей степени сказывается охлаждающее действие непрерывно загружаемой шихты, а также тепла, поступающего по электроду из ванны печи. На температуру периферийных слоев электрода в значительной мере оказывают влияние условия контактирования и охлаждения контактных щек. Вблизи верхней кромки щек разность температур между центром и поверхностью электрода может достигать 100 °С и более. По-видимому, в этом случае происходит отвод тепла по кожуху [2].

Одной из наиболее важных особенностей распределения температурных зон является явно выраженный наклон изотерм начала коксования электродной массы, при этом сторона электрода, обращенная к электроду одноименной фазы, является более горячей, что характерно также и для ферросиликомарганцевых пря-

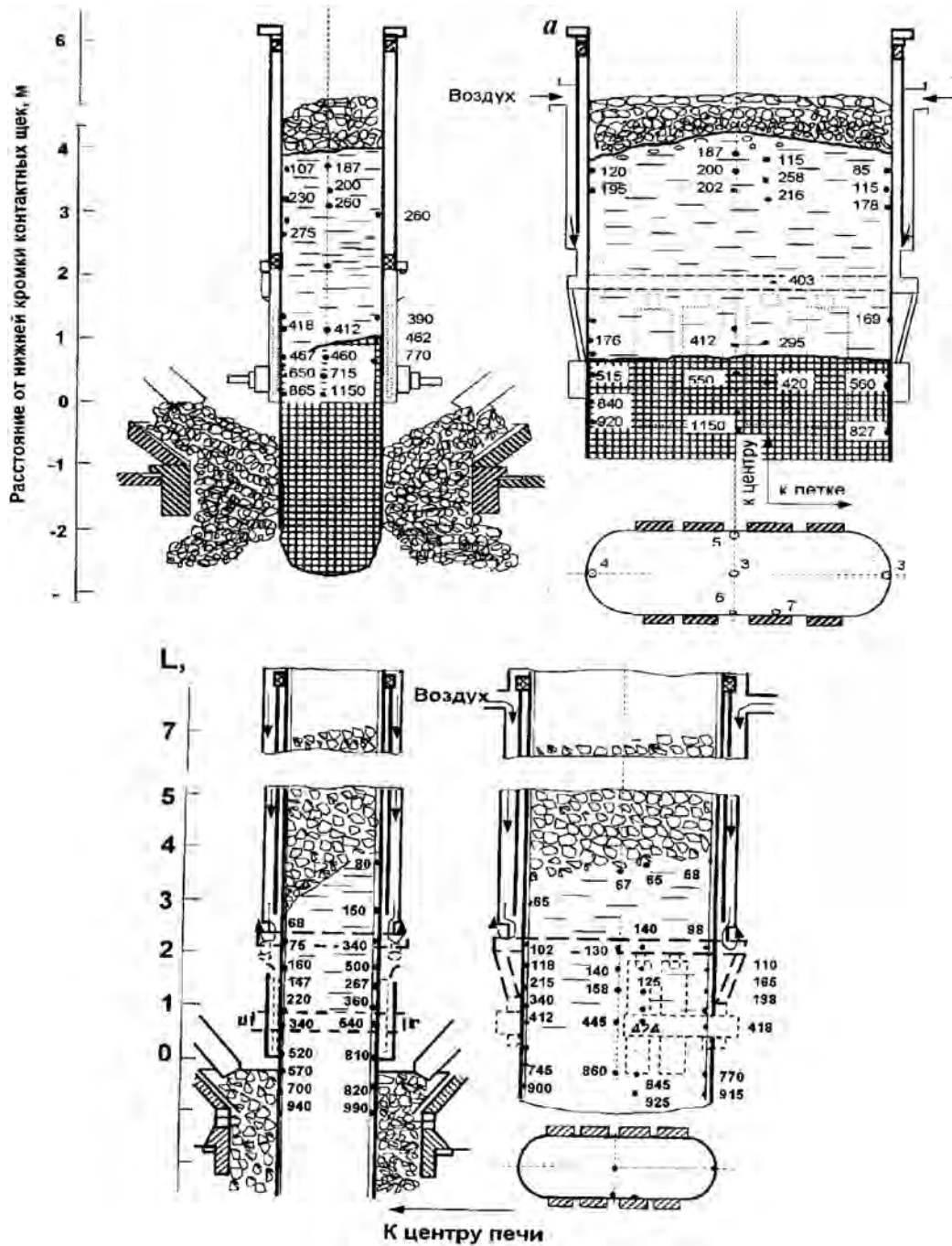


Рис. 2. Температурное поле электрода печи РПЗ-63 при:

а - выплавке ферросиликомарганца; б - ферромарганца

моугольных печей. В отдельных случаях перепад температур достигает 200-250 °С и более, что является крайне нежелательным явлением, способствующим развитию расслоения (сепарации) компонентов электродной массы, и, как следствие, ухудшению эксплуатационной стойкости рабочего конца электрода. Необходимо, по-видимому, внести незначительные изменения в конструкцию систем обдувки с целью получения возможности более интенсивно обдувать «горячую» сторону электрода, что позволит уменьшить или ликвидировать асимметрию теплового поля электрода.

Наиболее важным признаком надежности самообжигающегося электрода является уровень зоны начала коксования (изотермы 400-600 °С). Проведенные исследования свидетельствуют, что у печей РПЗ-63 при выплавке углеродистого ферромарганца на мощности 52-55 МВт зона коксования находится на 350-450 мм выше нижней кромки контактных щек, в отдельных случаях - ниже. Такое положение зоны коксования можно считать практически оптимальным, хотя при увеличении мощности печи может возникнуть необходимость разработки мероприятий, позволяющих повысить уровень зоны коксования.

Электропечи фирмы «Танабэ-какоки» (Япония), с тремя самообжигающимися электродами диаметром 2000 мм установлены на Никопольском заводе ферросплавов, постоянно требуют решения задач обеспечения надежности печного оборудования, в частности, самообжигающихся электродов. Установленная мощность трансформатора печи РКГ-75 составляет 81 МВА, фактическая же рабочая мощность равна 45 МВт, проектная производительность 90 тыс. т в год.

Механизм гидродожима и перемещения электрода гидравлический (два цилиндра), опускание электрода под собственным весом. Для предотвращения поперечного смещения электрода установлены направляющие ролики. Рабочее давление в цилиндре 140 кг/см<sup>2</sup>. Механизм перепуска электрода представляет гидравлически приводимую систему с двумя фрикционными стальными лентами. Верхняя фрикционная лента поддерживается 4-мя гидроцилиндрами. Зажатие электрода фрикционными лентами производится гидроцилиндрами с усилием 50 т. Рабочее давление в цилиндре 112 кг/см<sup>2</sup>, ход – 15 мм. Скорость закрепления фрикционных лент 1000 мм/мин.

Управление перепуском может быть ручное и автоматическое, величина разового перепуска 10 мм. К особенностям конструкции печи РКГ-75 относится также зажимное устройство электрода, представляющее собой конусную зажимную систему. Наружная сторона контактной щеки электрода и кольцо, окружающее контактные щеки выполняются конусными. При перемещении вверх или вниз конусного кольца посредством гидромотора контактные щеки закрепляются или ослабляются относительно электрода (рис. 3). Усиление зажатия контактных щек идет последовательно: гидромотор, редуктор, цилиндрическое прямозубное колесо, приводной вал, звездочка, цевочное зубчатое колесо, звездочка, подъемный и спускающий вал конусного кольца, конусное кольцо, контактные щеки электрода (рис. 3) [3].

Результаты выполненных исследований по определению температурных полей электродов свидетельствуют, что при работе печи на мощности 42-45 МВт, рабочем токе 145-150 кА и среднем расходе электрода 550 мм/сутки изотерма коксования имела вогнутый характер и находилась на уровне +550 и +200 мм с горячей и холодной стороны соответственно. Высота столба расплавленной массы (100-350 °С) достигает 1,5-2,0 м, а изотерма размягчения (70-100 °С) находится на уровне 1,3-2,3 м выше нижней кромки контактных щек. Контактные щеки оказывают весьма значительное охлаждающее воздей-

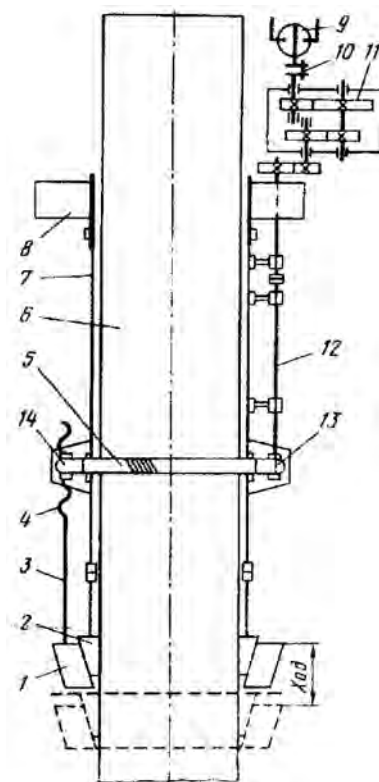


Рис. 3. Схема работы зажимного контактного устройства:

- 1 – конусное кольцо; 2 – контактные щеки;
- 3 – подъемно-опускающий вал; 4 – винт;
- 5 – зубчатое колесо; 6 – электрод; 7 – несущий цилиндр; 8 – кольцо несущего цилиндра;
- 9 – гидромотор; 10 – муфта; 11 – редуктор;
- 12 – приводной вал; 13, 14 – звездочки

ствие на электрод, в связи с чем ниже зоны коксования перепад температур на участках, находящихся в контактных щечках и между ними, достигает 100-120 °С (рис. 4). Температура подсводового пространства в районе электродов достигает 1000-1100 °С. Относительно низкое положение зоны коксования требует строгого соблюдения режимов перепуска электродов (по 100-200 мм три раза в сутки) и, соответственно, режимов обдувки в различные периоды времени года, обеспечения высокого качества сварных швов кожуха, равномерности загрузки электродной массы. Высокая надежность работы электродов печи РКГ-75 обеспечивается применением кожуха листовой стали толщиной 4 мм. Для повышения зоны коксования была рекомендована, освоена и внедрена качественно более теплопроводная электродная масса, содержащая карбид кремния [3].

Практика эксплуатации рудовосстановительных электропечей последних лет свидетельствует, что частые ограничения предприятий в электроэнергии вынуждают их снижать, а иногда и вовсе останавливать электрометаллургические агрегаты на некоторое время. Это обстоятель-

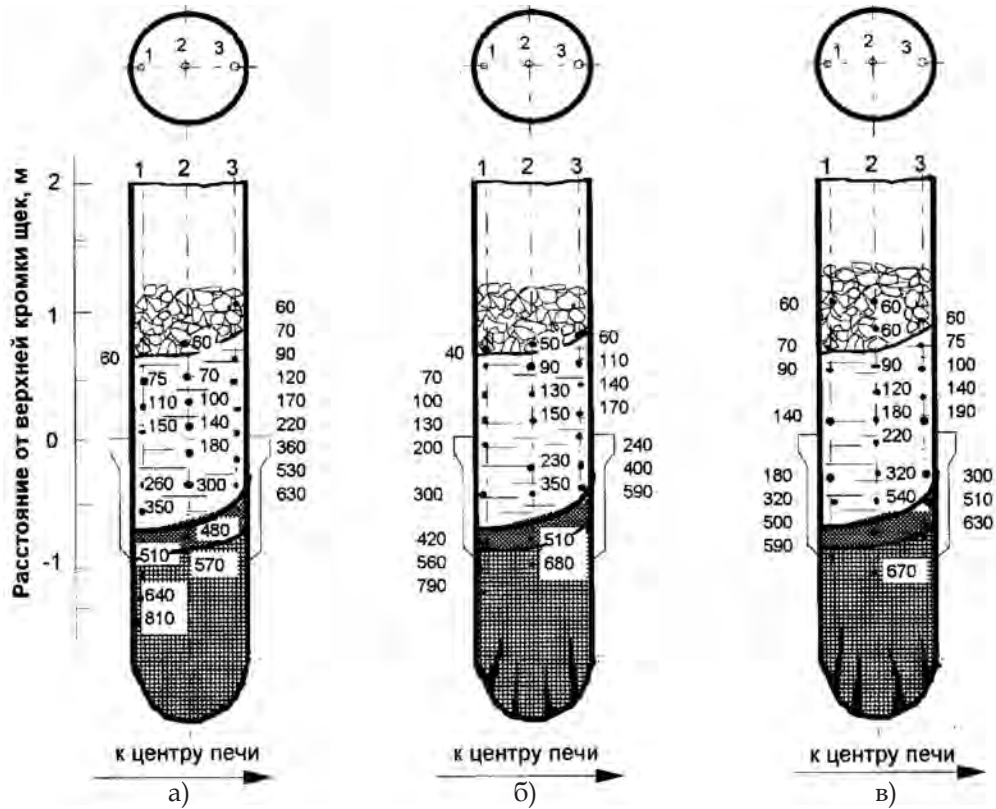


Рис. 4. Температурные поля электродов трехэлектродной электропечи РКГ-75, выплавляющей ферросиликомарганец

ство весьма негативно сказывается на эксплуатационной стойкости самообжигающихся электродов, так как около 80 % их обрывов происходит после «горячих» и «холодных» простоев и термических напряжений, возникающими в теле электрода при длительной остановки печи. В период остановки печи скорость охлаждения наружной поверхности электрода достигает 160-180 °С в час, что в 8-10 раз превышает допустимые скорости охлаждения при производстве пресованных угольных и графитированных электродов, что приводит к возникновению значительно большего градиента температур по сечению, чем тот, который существовал в работающем электроде. Когда возникающие термические напряжения превышают предел механической прочности материала электрода, в поверхностном слое образуется трещина.

При включении печи под токовую нагрузку резко возрастает коэффициент термического расширения, и зазор между трещинами увеличивается. Площади раздела трещины становятся местом дополнительного электрического сопротивления, где выделяется значительное количество тепла. Температура в месте контакта возрастает. Происходит интенсивное окисление углеродных компонентов, выходящих на поверхность раздела. При наборе токовой нагрузки после остановки печи электроды также, как правило, обрываются, период выхода печи

на полную мощность затягивается, а производительность уменьшается [1, 2].

Существовала практика медленного набора мощности после длительного простоя печи, с целью предотвращения резкого термического удара. По нашему мнению этот прием не оказывает существенного влияния на стойкость электрода. При включении печи после простоя электрический ток, проходя по поверхностным слоям электрода, разогревает их и, тем самым, снимает возникающие термонапряжения. Однако если в электроде в период простоя образовались трещины, то замедленный разогрев только отдалит обрыв электрода, но не предотвращает его.

На ПАО «НЗФ» выполнены исследования и определены величины температурного перепада между центром и поверхностью электрода в период остановки печи и последующего набора мощности. Градиент температур при нерегулируемом режиме остановки печи достигает 200-400 °С (рис. 5).

С целью предотвращения обрывов, связанных с остановками и длительными простоями, разработан и внедрен способ подготовки электродов к отключению печи, в основу которого положен принцип плавного охлаждения поверхности электрода путем снижения токовых нагрузок. За 2-3 сут. до остановки печи электроды путем уменьшения или прекращения пере-

пуска укорачиваются на 400-500 мм, за 6-8 ч токовые нагрузки плавно уменьшаются до 20-30 % от номинальных, производят перепуск электродов и отключают печь.

Такой режим позволил с одинаковой скоростью охладить центр и поверхность электрода на 200-300 °С, переместить зону, наиболее подверженную трещинообразованию, под свод печи, т. е. снизить скорость дальнейшего охлаждения. В конечном итоге максимальный температурный перепад не превышал 200 °С, что значительно повысило стойкость электродов. После внедрения разработанного режима на 16 электропечах (78 электродов) количество обрывов сократилось на 47,7 %, за счет чего повышена производительность и снижен расход электроэнергии (рис. 5).

Необходимость моделирования на ПЭВМ электрических и тепловых полей самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей возникает как на стадии их проектирования, так и при отработке и оптимизации технологий в процессе работы. С этой целью разработаны алгоритмы и программный комплекс, позволяющий моделировать тепловые поля ферросплавных печей. Программа написана на алгоритмическом языке Турбо-Паскаль и С++ и не требует использования каких-либо специальных системно зависимых средств на всех этапах ее работы [4, 5, 7].

Построению математической модели предшествовала формулировка решаемых задач в векторной форме с учетом влияния основных технологических, электрических и конструктивных параметров. В основу модели положено уравнение распространения тепла в электроде с учетом влияния различных факторов. Моделям сопоставлены их численно-аналитические аналоги, обладающие точностными свойствами, аналитической и вычислительной простотой численных решений, хорошей техноло-

гичностью передачи информации между внутренними узлами сеточной области и границей, где заданы условия однозначности. Для построения адекватных и экономичных алгоритмов решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих тепловые поля электрода, применялись конечно-разностные методы и метод расщепления по пространственным переменным Писмана-Рекфорда, что позволило свести алгоритм к скалярным прогонкам и, тем самым, построить экономичные по количеству арифметических операций схемы.

При построении модели использовали уравнения и граничные условия, адекватно описывающие реальные процессы, протекающие в каждой температурной зоне электрода. Для зон твердой массы – уравнения теплопроводности, а для «жидкой зоны» использовали систему уравнений Навье-Стокса применительно к вязкой не сжимающей жидкости. Совокупность базисных задач, возникающих при анализе температурных полей электродов рудовосстановительных печей, допускает объединение уравнений, условий однозначности и их записи в стандартизированной форме:

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = A(Y)\nabla^2 Y + B(Y)\frac{\partial Y}{\partial y} + C(Y)\frac{\partial Y}{\partial x} + D(Y)\frac{\partial Y}{\partial z} + W,$$

где  $Y = T_k$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  – вектора искомым функций температур, упорядоченных по  $k$ -м зонам электрода;  $A(Y)$ ,  $B(Y)$ ,  $C(Y)$ ,  $D(Y)$  – известные функции, характеризующие физико-механические, теплофизические и электрические свойства электродной массы;  $W$  – векторы источников, характеризующих теплопередачу из печи, удельную теплоту коксования электродной массы, «джоулево тепло» электрического тока, тепло колошниковых газов, теплопередачу в окружающую среду и шихте, с охлаждающей водой, на нагрев и расплавление массы и т. д. На динамику процесса наложены начальные и граничные условия.

При анализе различных методов решения системы предпочтение было отдано методу расщепления по пространственным переменным, который позволяет построить компактную систему алгоритмов для реализации решения рассматриваемого класса задач, и допускает дополнение системы при увеличении количества влияющих на температурное поле факторов.

В основу программы положена идея структурного программирования с пошаговой детализацией решаемых задач и формирования ее структурных моделей. Отдельные фрагменты программы оформлены в виде функций-операторов, локализованных в одном месте про-

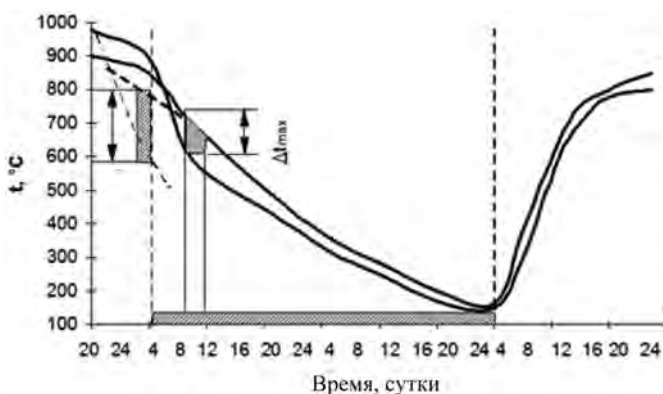


Рис. 5. Изменение температуры в самообжигающемся электроде печи РПЗ-63 после ее остановки

граммы, что удобно при внесении изменений в программу.

Средства комплекса программы позволяют вводить исходные данные, необходимые для расчета, анализировать и обрабатывать результаты, а также выдавать их в виде таблиц и рисунков. Разработанный комплекс программ автоматизированной системы температурного анализа может быть использован для выявления и прогнозирования рациональных условий формирования электродов.

Для идентификации процессов, протекающих в электродах, предложен метод, основывающийся на принципах решения обратных задач теплообмена, если по определенной информации о температурном или электрическом полях, известных из эксперимента, требуется восстановить какие-либо причинные характеристики. Проведена классификация наиболее характерных обратных задач теплообмена применительно к эксплуатации самообжигающихся электродов. Разработаны модели, алгоритм и программа решения граничных обратных задач теплопроводности (ОЗТ) применительно к идентификации процессов теплообмена в самообжигающемся электроде. Алгоритм обладает пошаговой регуляризацией, аттестован на аналитических решениях задач теории теплопроводности, достаточно просто обобщается на решение других классов обратных задач и может быть рекомендован в практику обработки и интерпретации данных теплофизических измерений применительно к идентификации процессов теплообмена в самообжигающихся электродах рудовосстановительных электропечей.

Обобщены результаты исследований микроструктуры и физико-механических свойств листового (2-4 мм) металла, используемого для изготовления кожухов непрерывных самообжигающихся электродов, нагреваемого до 1300 °С в окислительной и малоокислительной газовых средах в контакте с электродной массой. Исследовали также образцы, вырезанные из кожухов электродов рудовосстановительных электропечей при их остановках. С ростом температуры потери массы листового металла в окислительной атмосфере возрастают и при 1000 °С образцы практически полностью окисляются. Прочностные и пластические характеристики при этом также снижаются. Металл, нагретый в малоокислительной атмосфере незначительно окисляется при повышении температуры до 1200 °С [6, 8]

В отсутствии контакта с электродной массой при 800-900 °С в металле наблюдается рост зерна и частичное обезуглероживание. Значительному науглероживанию подвергаются образ-

цы, нагретые в среде электродной массы. При 1250 °С структура металла соответствует перлиту. В металле кожуха самообжигающегося электрода печи РПЗ-63, отобранном в районе нижней кромки контактных щек, имеет место существенный рост зерна. На участке 0,5 м ниже щек металл сильно науглерожен. Исходная ферритная структура превращается в феррито-перлитную, что сопровождается повышением  $\sigma_b$  разрыву до 540-584 МПа. При этом значения  $\delta$  снижаются на 3,2-5,2 %.

Исследованиями, на специально созданной установке, для механических испытаний образцов под токовой нагрузкой, определена температурная зависимость механических характеристик цельных и сварных образцов малоуглеродистых сталей от вида сварных швов. Установлено (таблица), что у металла, сваренного в «стык» временное сопротивление разрыву на 10-30 % меньше, чем у цельного образца.

У образцов кожуха из СтЗсп, сваренных электродами типа АНО-4 в стык с накладкой, тройным швом с соблюдением всех технологических требований, механическая прочность на разрыв больше, чем у цельного образца.

Полученные результаты свидетельствуют, что технология наращивания секций кожуха (общая высота кожуха 15-20 м) имеет большое значение особенно для печей РКГ-75, где единственно допустимым типом сварного шва следует принять тройной.

Результаты выполненных исследований позволили разработать и внедрить в условиях ПАО «НЗФ» способ полуавтоматической сварки стальных кожухов самообжигающихся электродов сплошной и порошковой проволокой СВ-08. Г2С в среде  $CO_2$ , что обеспечило высокую стабильность процесса сварки, повысить качество сварных соединений, увеличить стойкость электродов и значительно уменьшить трудоемкость операции наращивания кожуха [6].

### **Выводы**

Выявлены закономерности распределения температур и характер расположения агрегатных зон самообжигающихся электродов электропечей РКЗ, РПЗ и РКГ. Установлены и внедрены на ПАО «НЗФ» оптимальные режимы эксплуатации в период остановок печей, заключающиеся в обеспечении равномерного соотношения скоростей охлаждения центра и поверхности электрода, которые позволили сократить количество их обрывов, повысить производительность печей, снизить затраты электроэнергии и шихтовых материалов.

Разработаны алгоритмы и программы комплексного расчета на ПЭВМ тепловых полей са-

Механические характеристики цельных и сварных образцов при различных температурах (нагрев электрическим током)

Тип шва	Марка стали	Толщина листа, мм	$\sigma$ , кг•с/мм <sup>2</sup> при температурах, °С		
			20	300	600
Контрольный, без сварного шва	СтЗсп	4,5	46,7	43,6	10,28
	СтЗкп	3,9	42,6	39,8	8,84
	Ст2пс	3,0	38,3	35,1	7,96
в нахлестку	СтЗкп	3,9	41,3*	29,2*	5,48*
в стык без зазора	СтЗкп	3,9	39,2*	31,5*	5,5*
	Ст2пс	3,0	37,5*	29,0*	7,5*
в стык с зазором 3 мм	СтЗсп	4,5	40,7*	33,5*	6,8*
в стык с зазором 10 мм, накладкой, тройной шов	СтЗсп	4,5	48,7	39,0	8,4

Примечание.\* – Разрыв по сварному шву.

мообжигающихся электродов в нестационарной постановке с учетом двух и трех пространственных измерений. Созданная математическая модель позволяет рассчитывать тепловые поля круглых и плоских электродов как на стадии проектирования печей, так и при оптимизации технологий в процессе работы. Программа, написанная на алгоритмическом языке Турбо-Паскаль и С++, оформлена в виде автоматизированной системы температурного анализа для ПЭВМ.

Проведены исследования листовой стали, используемой для изготовления кожухов электродов при нагреве в окислительной и малоокислительной газовых средах, в контакте с электродной массой при температурах до 1300 °С, а также образцов, вырезанных из кожухов электродов эксплуатируемых электропечей при их остановках. Установлено, что микроструктура и свойства стальных кожухов НСЭ при их формировании претерпевают существенные изменения и являются отражением сложных физико-химических процессов и температурных условий взаимодействия с электродной массой и окружающей средой.

Выполнен анализ условий и особенностей технологии наращивания кожухов электродов при использовании различных видов сварки; исследован и внедрен в условиях ПАО «НЗФ» способ полуавтоматической сварки кожухов самообжигающихся электродов сплошной и порошковой проволокой в среде углекислого газа, что обеспечило высокую стабильность процесса сварки, повышение качества сварных соединений, увеличение стойкости электродов и снижение трудоемкости операции наращивания.

### Библиографический список

1. Гасик М. И. Самообжигающиеся электроды рудовосстановительных печей. – М.: Металлургия, 1984. – 248 с.

2. Кашкуль В. В., Гриншпунт А. Г., Люборец И. И. Передовой опыт эксплуатации рудовосстановительных электропечей. – М.: Металлургия, 1988. – 88 с.

3. Кашкуль В. В., Гриншпунт А. Г., Лысенко В. Ф. Исследование условий формирования электродов диаметром 2,0 м // В кн.: Физико-химические основы металлургии марганца. – М.: Наука. – 1983. – С. 178-182.

4. Гриншпунт А. Г., Шмукин А. А. Идентификация процессов теплообмена в самообжигающихся электродах рудовосстановительных печей // Известия РАН Металлы. – 1997. – № 6. – С. 29-33.

5. Гриншпунт А. Г., Шмукин А. А. Математическое моделирование тепловых полей при обжиге цилиндрического композитного стального электрода с внешним и внутренним источником тока // Доповіді Національної Академії Наук. – 1998. – № 3. – С. 114-121.

6. Люборец И. И., Лобовко А. Г., Гриншпунт А. Г. Повышение эксплуатационной стойкости самообжигающихся электродов путем полуавтоматической наварки кожухов // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 1998. – № 4. – С. 25-26.

7. Гриншпунт А. Г., Шмукин А. А., Гендин И. В. Математическое моделирование температурных полей самообжигающихся электродов рудовосстановительных печей в трехмерной нестационарной постановке // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 5. – С. 27-31.

8. Гриншпунт А. Г., Гасик Л. Н., Кашкуль В. В. О стойкости стальных кожухов самообжигающихся электродов рудовосстановительных электропечей // Сталь. – 1995. – № 11. – С. 22-26.

Поступила 03.06.2015