Д. т. н. **Г. Д. Апалькова** (✉)

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, Россия

УДК 621.3.036.6.017:536.495

РАЗРУШЕНИЕ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО УДАРА

Проанализировано разрушение графитированных электродов при эксплуатации. Показано, что прогнозируемое поведение электродной колонны при термических ударах обеспечивает использование комплексных характеристик графитированных электродов: термостойкость материала электрода как технологический фактор их производства и зависимость допустимого тока эксплуатации от критерия качества элемента конструкции электрической печи — электродной колонны как эксплуатационный фактор.

Ключевые слова: *термостойкость, графитированные электроды, термический удар, критерий качества, электродная колонна, допустимый ток эксплуатации.*

Современные тенденции в технологии производства характеризуются интенсификацией процессов и существенным увеличением мощности модернизируемых и вновь проектируемых видов оборудования, что повышает требования к качеству используемых материалов. Одним из важнейших свойств материала является термостойкость, определяющая его применимость и срок службы в различных условиях. Практически всегда термостойкость играет важную роль при наличии температурных градиентов.

Термостойкость можно определить как предел прочности материала при термических напряжениях — механических, возникающих в твердом теле вследствие неравномерного распределения температуры отдельных его частей или ограничения возможности его теплового расширения в целом. Термостойкость обосновывается как физическое свойство материалов, являющееся интегральным показателем во взаимосвязи с фундаментальными свойствами вещества. Исследователи термостойкости отмечают сложность проблемы, связанную с тем, что в научном плане не существует единого критерия ее оценки и универсальной методики определения [1, 2].

В зависимости от поставленных целей для расчета критериев термостойкости используют те или иные формулы, в основе которых лежат теоретические предпосылки, разработанные В. Д. Кинджери [3]. Расчетные критерии термостойкости предполагают наличие гомогенной изотропной структуры с линейной упругостью и хрупкостью. Однако углеграфитовые электродные материалы к числу таковых не относятся.

✉
Г. Д. Апалькова
E-mail: apalkova@yandex.ru

Вместе с тем достаточно широко используется формула критерия термостойкости, объединяющая, в частности, основные физико-механические характеристики углеграфитовых материалов [2, 3]:

$$T = \frac{\sigma_p \lambda}{E \alpha}, \quad (1)$$

где T — критерий термостойкости; σ_p — предел прочности на разрыв; λ — теплопроводность; E — модуль упругости; α — ТКЛР.

Наряду с расчетными практикуются физические методики оценки термостойкости. Термостойкость огнеупорных изделий оценивают числом циклов нагрева и охлаждения до частичного или полного разрушения или временем, необходимым для образования трещины в образце под воздействием термических напряжений в условиях радиального градиента температуры при локальном нагреве образца. Определение сопротивляемости разрушению, происходящему в результате резкой смены температур при поочередном нагреве до 1300 °С и охлаждении проточной водой, оценивается числом циклов нагрева и охлаждения до частичного или полного разрушения [4]. Этот метод прост в исполнении, но имеет ограниченную область применения и не подходит для высокотемпературных материалов. Известны физические методы оценки термостойкости высокотемпературных углеграфитовых материалов, в том числе в электрической дуге [5], но результаты испытания крупнозернистых материалов, к числу которых относится электродная продукция, существенно зависят от того, где сфокусирована дуга

— в межзеренном промежутке, в области мелких, средних зерен или на крупном зерне, свойства которых различаются.

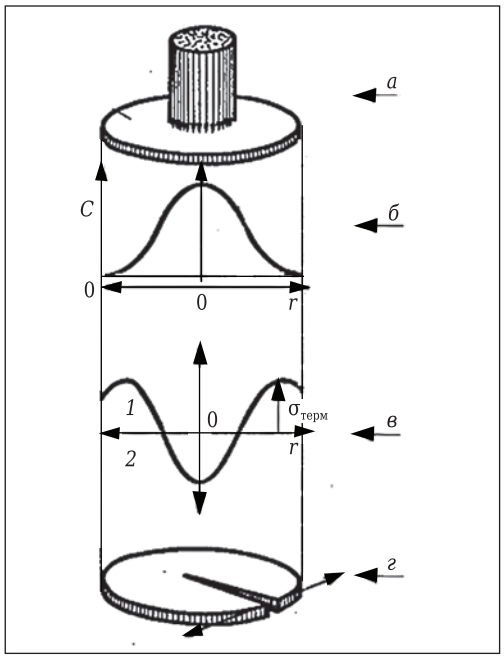

Рис. 1. Радиальное распределение термических напряжений $\sigma_{терм}$ в образце [7]: *а* — подвод электрического тока к образцу; *б* — радиальное распределение температуры; *в* — термические напряжения в образце: *1* — область растяжения; *2* — область сжатия; *г* — образование трещины ($\sigma_{терм} \geq \sigma_р$)

Для электродных крупнозернистых материалов достаточно широко используется электроконтактный способ определения термостойкости углеграфитовых материалов в условиях радиального градиента температуры. В основу метода положено создание термических напряжений в углеграфитовом образце путем его нагрева пропусканием электрического тока через участок в центре образца диаметром 0,2–0,4 его диаметра до разрушения. Показателем термостойкости выбрано время, необходимое для образования трещины в образце в нормированных условиях [6–9]. Характер радиального распределения температуры и вызванных температурным перепадом тангенциальных термических напряжений при этом показан на рис. 1 [7].

Результаты исследований углеродных материалов одного назначения шести различных марок и производителей показывают, что если тенденции изменения измеренных значений термостойкости и расчетного критерия Кинджери для исследованных марок в целом сохраняются, то масштаб их соотношений существенно различается (рис. 2) [7].

Анализ взаимосвязи измеренных значений термостойкости и физико-механических характеристик материала, входящих в формулу (1), показывает, что наибольший коэффициент корреляции *r* имеет пара термостойкость – $\sigma_р$, затем следует термостойкость – λ (рис. 3); по

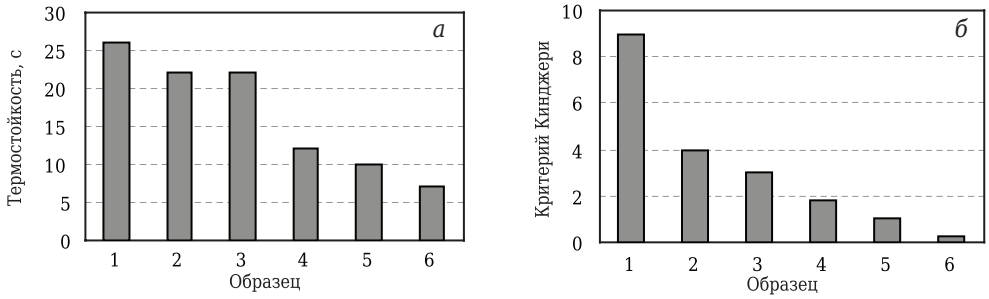

Рис. 2. Измеренные (*а*) и расчетные (*б*) значения термостойкости образцов 1–6 разных марок углеродных материалов одного назначения [7]

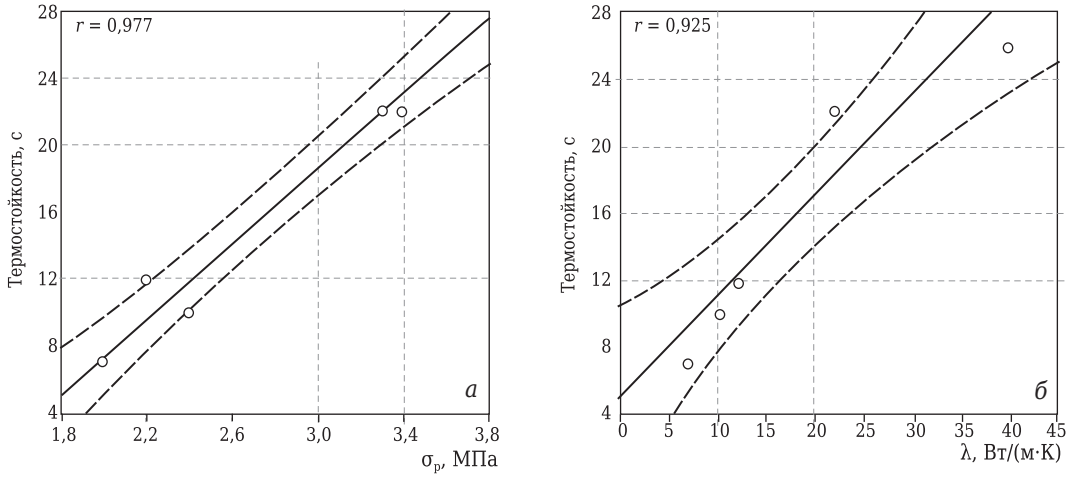

Рис. 3. Взаимосвязь корреляции пар термостойкость – предел прочности при разрыве $\sigma_р$ (*а*) и термостойкость – теплопроводность λ (*б*) разных марок материалов одного назначения [7]

остальным свойствам взаимосвязи слабее: по ТКЛР r = 0,799, по модулю упругости r = 0,376. Это свидетельствует о том, что термостойкость в области высоких температур имеет свои специфику и закономерность [7].

Изучение термостойкости позволяет проводить сравнительный анализ широкого класса углеграфитовых электродных материалов и оптимизацию их потребления в промышленных условиях [8, 9]. Принимая во внимание, что физико-механические характеристики, входящие в критерий термостойкости формулы (1), регулируются технологическими параметрами производства (видом и свойствами используемого сырья и гранулометрией наполнителя, степенью совершенства кристаллической структуры в результате термообработки, наличием дополнительных технологических приемов — добавки, пропитка и др.), термостойкость может служить квалификационным параметром в качестве технологического фактора [9].

Оценивая графитированные электроды, следует отметить их специфику как элементов конструкции токоподводов. Перед использованием из электродов формируют электродные колонны. Они являются расходуемыми со стороны электрической дуги, и по мере их расхода с противоположной стороны их наращивают новыми электродами через резьбовое соединение в системе ниппель – ниппельное гнездо электрода [10]. В этой системе ниппель подвержен более значительным нагрузкам, чем электрод, что предопределяет некоторое различие их свойств и, соответственно, технологические параметры производства. При формировании требований к электродам по техническим характеристикам целесообразно учитывать допустимый ток эксплуатации. Допустимая электрическая нагрузка — ток или плотность тока — отражает способность электродов проводить электрическую энергию в рабочее пространство печи без термического разрушения своей конструкции, т. е. эксплуатационную стойкость электродной колонны.

Основным показателем электродов, исходя из их назначения, является удельное электросопротивление, которое определяет электрические потери и обусловливает при эксплуатации локальный перегрев контактных участков электродов, в том числе в ниппельном соединении с повышенным сопротивлением за счет джоулева тепла. Это является, в свою очередь, причиной возникающих градиентов температуры, приводящих к трещинообразованию. Вместе с тем количество нормируемых физико-механических показателей электродов, отражающих их эксплуатационную стойкость, достаточно велико, поэтому существуют проблемы в комплексной оценке качества электродов и ниппелей в целом и рекомендуемых токовых нагрузках в частности.

Анализ патентно-технической литературы по комплексной оценке эксплуатационной стойкости электродов показывает, что общим для всех известных методик является выражение качества через абстрактное число (критерий качества), объединяющее ряд физико-механических свойств и позволяющее сравнивать марки электродов между собой [11]. В свое время в качестве научной основы при формировании требований к разным маркам электродов использовали критерий качества электродов, отражающий их эксплуатационную стойкость, включающий, в частности, удельное электросопротивление электродов, прочностные характеристики ниппелей и показатели точности резьбового ниппельного соединения электродов. В качестве прочностной характеристики ниппелей использован предел прочности при изгибе, методика определения которого отражает сложнонапряженное состояние ниппеля при обвале шихты при эксплуатации. В качестве показателей точности ниппельного соединения использованы предельное отклонение шага резьбы по всей длине свинчивания и предельное отклонение диаметра резьбы ниппельного гнезда, в качестве показателя физико-механических свойств электродов использовано удельное электросопротивление, отражающее целевое назначение электродов (токоподводы в электротехнических агрегатах) и являющееся наиболее чувствительной структурной характеристикой углеродных материалов, связанной корреляционной зависимостью с теплопроводностью, лимитирующей термостойкость. Однородность свойств оценивается по методике статического приемочного контроля по механической прочности графитированных электродов и ниппелей. По номограмме в зависимости от величины критерия качества определяется допустимый ток эксплуатации. Эту методику отличает большой объем используемых параметров, что усложняет процесс определения [11].

Вместе с тем исследователи отмечают, что и в современных условиях интенсификации по-прежнему остаются актуальными концепции, описывающие физико-механические особенности собственно механизма разрушения конструктивных узлов электродных колонн в условиях термического удара [12, 13]. Типичные случаи трещинообразования торцов электродов при превышении величины тока выше допустимой показаны на рис. 4 [14]. Образование торцевых трещин приводит к неконтролируемому падению нижнего электрода с ниппелем или без него в рабочее пространство печи. Как показали исследования по техническому аудиту эксплуатации электродов на различных типах печей, в современных условиях основные статьи расхода электродов и механизмы их образования сохраняются, в том числе в ряде случаев и

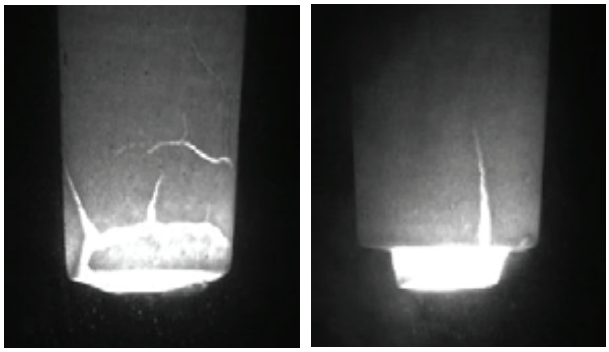

Рис. 4. Типичные случаи трещинообразования торцов электродов при экстремальном увеличении токовой нагрузки [14]

неконтролируемые термические разрушения. Схема-модель процесса расхода электродов показана на рис. 5 [15].

Цель настоящей работы — исследование факторов риска разрушения электродной колонны в условиях термического удара. Процессы трещинообразования исследовали с использованием методики [6, 7], предусматривающей воздействие на образец термических напряжений в условиях радиального градиента температуры и ранжирование опасных факторов, определяющих термическое разрушение углеграфитовых токоподводов. Преимуществом использованной методики является масштабное моделирование процесса образования трещины в экстремальных условиях эксплуатации. Влияние различных факторов на термическое разрушение оценивали методом математического планирования эксперимента. В качестве независимых факторов приняты:

– соотношение диаметра зоны нагрева и диаметра образца, моделирующее влияние местных локальных разогревов электродов, в частности контактных плоскостей ниппельного соединения при ненадлежащем электрическом контакте по всей торцевой поверхности свинченных электродов;

– давление токоподводов на образец, моделирующее усилие свинчивания электродов, лимитирующее электросопротивление ниппельного соединения;

– токовая нагрузка.

Матрица планирования представляла собой полный факторный эксперимент 2^3 (см. таблицу). Выбор области факторного пространства обусловлен предельными значениями соотношений, обеспечивающих термическое разрушение образцов в условиях эксперимента. Откликом в эксперименте служит коэффициент термического удара, характеризующий способность токоподводящей конструкции противостоять образованию термических трещин и представляющий собой время от начала нагрева до момента образования трещины в образце. После обработки результатов эксперимента по стандартным программам получено уравнение регрессии в коде

$$Y = 12{,}8 - 3{,}0X1 + 0{,}9X2 - 0{,}9X3 - 0{,}6X1X2. \quad (2)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии устанавливали по критерию Стьюдента, адекватность уравнения экспериментальным данным — по критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95.

Результаты исследований по количественной оценке факторов термического разрушения, являющегося одной из основных причин повышенного расхода электродов при эксплуатации, показали преимущественную роль в разрушении местных локальных разогревов при ненадлежащем электрическом контакте в системе электрод – ниппель – электрод. На практике это

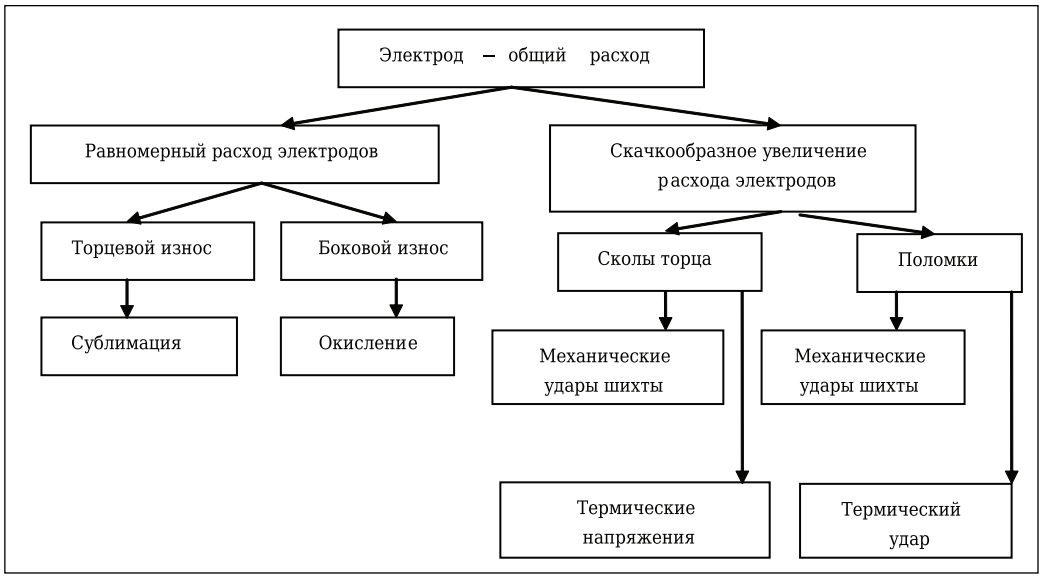

Рис. 5. Схема-модель процесса расхода электродов [16]

Матрица планирования полного факторного эксперимента термического разрушения углеграфитовых образцов

Параметр	Соотношение диаметра зоны нагрева и диаметра образца		Токовая нагрузка		Давление токоподводов на образец		Коэффициент термического удара, с
	относительные единицы	кодовое обозначение	А/см^2	кодовое обозначение	МПа	кодовое обозначение	
Основной уровень	0,3	0	175	0	0,20	0	–
Интервал варьирования	0,1	–	25	–	0,04	–	–
Верхний уровень	0,4	+1	200	+1	0,24	+1	–
Нижний уровень	0,2	–1	150	–1	0,16	–1	–
Кодовое обозначение		*X*1		*X*2		*X*3	*Y*
Опыт 1		–		–		–	15,5
Опыт 2		+		–		–	10,1
Опыт 3		–		+		–	18,3
Опыт 4		+		+		–	10,9
Опыт 5		–		–		+	13,2
Опыт 6		+		–		+	8,9
Опыт 7		–		+		+	16,3
Опыт 8		+		+		+	9,3

проявляется в повышенном переходном электросопротивлении ниппельного соединения. Негативная роль токовой нагрузки в исследованном диапазоне не выявлена, но в сочетании с давлением токоподводов на образец, лимитирующим выделение джоулева тепла в контактных плоскостях, также относится к факторам риска.

Возвращаясь к вопросу комплексной оценки эксплуатационной стойкости, следует отметить, что сегодня в перечне физико-механических показателей, входящих в способ определения допустимого тока эксплуатации с использованием критерия качества электродов [11], произошли существенные изменения. Так, в связи с разработкой и внедрением гармонизированного стандарта ГОСТ Р МЭК 60239–2014 «Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения» на основе международного стандарта IEC 60239 «Electrodes en graphite pour les fours a arc. Dimensions et denomination» геометрические параметры и их допуски практически сравнялись для всех марок и производителей, поэтому учитывать их для сравнения в критерии качества нецелесообразно.

Техническое переоснащение электродных производств обеспечило стабилизацию свойств как в объеме одной заготовки, так и в объеме производимых изделий. В нормативной документации минимизируется число регламентируемых показателей. В рамках разработки новых стандартов с учетом актуальности и целесообразности дальнейшего решения вопросов соответствия физико-механических свойств электродной колонны условиям их эксплуатации в целом и токовым нагрузкам в частности были усовершенствованы методы определения допустимого тока для электродов с учетом современных актуальных показателей их качества. Следует отметить, что термин «критерий качества электродов» целесообразно заменить на термин «критерий качества электродной колонны», как более полно отражающий характеризуемый объект.

Модифицированный критерий качества *K* объединяет среднее значение предела прочности при изгибе ниппелей $\sigma_{изг.н}$, удельное электросопротивление электродов $\rho_э$ и ТКЛР ниппелей $\alpha_{н(20–520\,°C)}$. Эти физико-механические показатели являются нормированными, т. е. обязательными к определению в соответствии с требованиями нормативной документации; их определение не требует дополнительных трудозатрат. Критерий качества электродной колонны в относительных единицах вычисляют по формуле

$$K = \frac{\sigma_{изг.н}}{\rho_э \cdot \alpha_{н(20–520\,°C)}}. \quad (3)$$

На рис. 6 показана зависимость допустимого тока эксплуатации от величины критерия качества в виде номограммы.

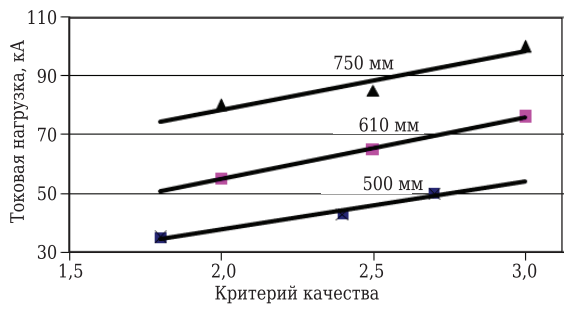

Рис. 6. Зависимость допустимого тока эксплуатации от критерия качества электродной колонны разных диаметров

Промышленные испытания электродов и ниппелей к ним подтвердили, что модифицированный критерий качества электродной колонны коррелирует с эксплуатационной стойкостью углеграфитовых токоподводов. Как следует из представленных данных, разрушение углеграфитовых токоподводов в условиях термического удара наиболее полно рассматривается в двух взаимосвязанных аспектах:

– термическое разрушение углеграфитовых материалов (материаловедческий аспект). Термостойкость служит квалификационным параметром в качестве технологического фактора;

– разрушение конструкции углеграфитовых токоподводов в условиях термического удара при повышенных токовых нагрузках. Квалификационным параметром служит критерий качества электродной колонны.

Таким образом, комплексные показатели, в том числе термостойкость материала и критерий качества электродной колонны, которые целесообразно назвать обобщенными характеристиками графитированных электродов, можно оценивать как свойства самого электрода-ниппеля и предсказывать по ним ожидаемое поведение электродной колонны при термических ударах при разных токовых нагрузках.

Экспортеры стран с переходной экономикой при попытке получить доступ своей продукции на зарубежные рынки сталкиваются с серьезными проблемами, и в частности связанными с информацией о добровольных и обязательных технических требованиях на предполагаемых рынках сбыта. По оценке специалистов, в настоящее время международные стандарты вносят более весомый вклад в обеспечение экономического роста, чем патенты и лицензии. В результате изучения мнения экономических кругов Немецкий институт по стандартизации (Deutsches Institut für Normung DIN) пришел к выводу, что мировой рынок сегодня нуждается в открытых международных стандартах [16]. При этом результаты из области научных норм целесообразно трансформировать в область инженерных рекомендаций. По уровню общности рассматриваемые вопросы относятся к конкретным предложениям (технологии инжиниринга как передача инженерно-консультационных услуг). Как следующий этап этих исследований на основании обобщения и использования соответствующего объема инженерных знаний, результатов наблюдений и исследований, обеспечивающих оптимизацию их потребления, минимизацию сколов при эксплуатации в рамках национальной стандартизации, разработаны стандарты «Графитированные электроды для электродуговых печей. Эксплуатация» и «Электроды графитированные и ниппели к ним. Технические условия» [17, 18].

Как было отмечено выше, ранжирование факторов, определяющих термическое разрушение, показало преимущественную роль в разрушении электродной колонны местных локальных разогревов при ненадлежащем электрическом контакте в системе электрод – ниппель – электрод, что на практике проявляется в повышенном переходном электросопротивлении ниппельного соединения и показывает важность этого вопроса среди других причин повышенного расхода электродов при их эксплуатации. Регулирование этого фактора обеспечено введением в нормативную документацию показателя «рекомендуемые крутящие моменты свинчивания электродов» в зависимости от их диаметра и «рекомендации по устранению саморазвинчивания электродной свечи при эксплуатации», обеспечивающие надлежащий электрический контакт в ниппельном соединении [17].

Соотношение критерия качества электродной колонны и токовой нагрузки легло в основу формирования ассортимента электродов по маркам, заложенного в нормативные документы на электроды и ниппели к ним, для эксплуатации при различных токовых нагрузках. В зависимости от используемого сырья, технологических особенностей производства и типа потребляющих электротехнических агрегатов и в соответствии с номенклатурой ведущих мировых производителей в новые стандарты заложены 4 марки электродов, требования к которым разработаны и согласованы в установленном порядке [18].

* * *

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.A03.21.0011.

Библиографический список

1. ***Колесников, С. А.*** Формирование уровня теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала / *С. А. Колесников, М. Ю. Бамборин, В. А. Воронцов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 30–38.

Kolesnikov, S. A. Formation of carbon-carbon composite material thermal conductivity standards / *S. A. Kolesnikov, M. Yu. Bamborin, V. A. Vorontsov* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 58, № 1. — С. 94–102.

2. ***Бабкин, М. Ю.*** Оценка термостойкости графитированных электродов / *М. Ю. Бабкин* // Современное состояние и перспективы развития электродной продукции, конструкционных и композиционных углеродных материалов : сб. докл. междунар. конф. — Челябинск : Энциклопедия, 2010. — С. 202–205.

3. ***Kingery, W. D.*** Factors affecting of thermal stress resistance ceramic materials / *W. D. Kingery* // J. Am. Ceram. Soc. — 1955. — Vol. 38, № 1.

4. **ГОСТ 7875.0–94.** Изделия огнеупорные. Общие требования к методам определения термической стойкости (Refractory products. Basic requirements for procedures of thermal shock resistance determination). — Введ. 1996-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 1995.

5. **А. с. 442394 СССР.** Способ испытания тугоплавких материалов / Ю. И. Барков, Н. В. Негуторов, А. Г. Пятковский // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. — 1974. — № 33.

6. **А. с. 1188582 СССР.** Способ определения термостойкости тугоплавких материалов / Е. В. Калядов, Г. Д. Апалькова, Н. В. Глушков, Э. С. Варыпаев, Н. Ф. Кондрашенкова // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. — 1985. — № 40.

7. ***Апалькова, Г. Д.*** К вопросу о термостойкости материалов, используемых в технологическом оборудовании современных процессов / *Г. Д. Апалькова* // Наука ЮУрГУ : материалы 68-й науч. конф. — Челябинск : изд-во ЮУрГУ, 2016. — С. 465–471.

8. ***Селезнёв, А. Н.*** Термостойкость перспективных марок углеграфитовых блоков для подин алюминиевых электролизеров / *А. Н. Селезнёв, Г. Д. Апалькова, В. В. Очков, В. И. Пирогов* // Новые огнеупоры. — 2005. — № 5. — С. 32–35.

Seleznev, A. N. Thermal stability of advanced carbon bottom blocks for aluminum electrolysis cells / *A. N. Seleznev, G. D. Apalkova, V. V. Ochkov, V. I., Pirogov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2005. — Vol. 46, № 4. — С. 235–238.

9. ***Vergazova, G.*** A new approach to establishing thermal shock resistance of cathode blocks / *G. Vergazova, G. Apalkova* // TMS Light Metals. — 2006. — P. 945–949.

10. **ГОСТ Р МЭК 60239–2014**. Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения (Electrodes en graphite pour les fours a arc. Dimensions et denomination). Введ. 2015-07-01. — М. : Стандартинформ, 2014.

11. **Пат. 2031552 Российская Федерация**. Способ определения допустимого тока для графитированных электродов / Апалькова Г. Д., Мянник А. Г., Тарынин Н. Г., Шафигин З. К., Давыдович Б. И., Мочалов В. В. — № 5060050/07 ; заявл. 25.08.92 ; опубл. 20.03.95, Бюл. № 8.

12. ***Armstrong, C. R.*** Electrode consumption in a modem hing-power electric steel shop / *C. R. Armstrong, T. L. Bosserman, K. E. Haibult* [et al.] // Iron & Steel Technology. — 2013. — № 1. — P. 57–68.

13. ***Белковский, А. Г.*** Меры по снижению расхода электродов на сталеплавильном заводе компании SDI в Батлере (реферат) / *А. Г. Белковский* // Новости черной металлургии за рубежом. — 2013. — № 2. — С. 23–26.

14. ***Borlée, J.*** Monitoring system for controlling and reducing the electrode consumption in DC EAF plants / *J. Borlée, M. Wauters, C. Mathy, M. Weber* // Final report Directorate-General for Research, 2009 / European Commission, Contract No RFSR-CT-2003-00024 1 September 2003 to 31 August 2006.

15. ***Апалькова, Г. Д.*** К вопросу эксплуатации электродов на электродуговых печах в современных условиях индустрии инжиниринга / *Г. Д. Апалькова* // Электрометаллургия. — 2015. — № 5. — С. 3–11.

16. DIN-Mitteilungen+elektronorm. — 2003. — № 6. — S. 3–6.

17. **ГОСТ Р 56973–2016.** Графитированные электроды для электродуговых печей. Эксплуатация (Graphite electrodes for electric arc furnaces. Exploitation). — Введ. 2016-06-20. — М. : Стандартинформ, 2016.

18. **ГОСТ Р 57613–2017.** Электроды графитированные и ниппели к ним. Технические условия (Graphite electrodes and nipples. Specifications). — Введ. 2018-08-01. URL http: // normacs.ru. ■

Получено 15.01.18
© Г. Д. Апалькова, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ