

Панов Е. Н.,
Педченко А. Ю.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ПЕЧЕЙ ГРАФИТИРОВАНИЯ КАСТНЕРА В УСЛОВИЯХ ПОТРЕБНОСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО РЫНКА

Проанализирована эффективность и целесообразность применения печей графитирования Кастнера и потребности современного рынка по производству графитированных электродов. Рассмотрены важные факторы, которые фундаментальным образом влияют на использование метода прямого нагрева при графитировании электродной продукции. Показаны основные тенденции развития новой технологии на отечественном рынке.

Ключевые слова: графитирование, электродная продукция, дуговая сталелитейная печь, печь прямого нагрева.

1. Введение

Графитирование углеродных материалов является сложным и многоступенчатым процессом трехмерного упорядочения атомов углерода в структуру графита под действием высоких температур. Этот этап использует до 80 % всей энергии, которая расходуется на изготовление графитированных изделий и решающим образом определяет качество готового продукта [1]. При данных обстоятельствах целесообразно повышение технико-экономических показателей и внедрение новых технологий процесса графитирования.

Мировое производство графитированных электродов в значительной степени зависит от выпуска стали в дуговых сталелитейных печах (ДСП). Рост мирового производства электростали является основным драйвером развития рынка графитированных электродов. Повышение мощностей ДСП требует изготовления качественных электродов больших диаметров, которые по мере технико-экономических показателей целесообразно графитировать только в печах прямого нагрева (ППН) по методу Кастнера.

При данных обстоятельствах исследование поведения рынка по изготовлению электродной продукции является, безусловно, актуальной задачей.

2. Формулировка целей и задач статьи

Целью статьи является анализ целесообразности и перспектив применения печей графитирования методом Кастнера в промышленности при изготовлении электродной продукции и детальная оценка зарубежного рынка по производству графитированных электродов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сравнение технико-экономических показателей и технологии производства графитированных электродов с помощью распространенных современных методов графитирования.

2. Анализ рынка по производству графитированных электродов.

3. Прогнозирование возможных тенденций дальнейшего развития производства электродной продукции.

3. Анализ литературных данных

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время более 40 % всей стали в мире плавится в дуговых сталелитейных печах, и этот показатель с каждым годом растет [2, 3]. Себестоимость произведенной таким образом стали напрямую зависит от количества использованной энергии и графитированных электродов [4]. Преимущественно в наше время все больше используют дуговые печи постоянного тока, которые экономически более выгодны, чем печи переменного тока. Чаще всего в ДСП используют графитированные электроды большого диаметра [3].

В основном для производства графитированных электродов используют методы Кастнера и Ачесона [5]. Так, для графитирования электродов больших диаметров используют исключительно ППН по методу Кастнера, а для электродов малых диаметров экономически более выгодно использовать печи, которые работают по методу Ачесона.

Показатели рынка свидетельствуют о том, что в настоящий момент лидером по производству углеродных и углеграфитовых материалов является Китай [6]. Крупнейшими компаниями по производству графитированных электродов являются SGL group и GrafTech International Ltd.

4. Анализ развития использования печей графитирования при производстве электродной продукции

ППН представляет собой электрическую печь сопротивления, где углеродные заготовки, которые выступают в качестве элемента конструкции печи, являются активным электрическим сопротивлением.

Нагрев электродных заготовок осуществляется за счет прямого пропускания через них электрического тока. Электроды нагреваются до 3000 °С основным образом за счет выделения в них джоулевой теплоты [7].

Графитирование углеродных электродов по методу Ачесона является чрезвычайно энергоемким и, соответственно, дорогостоящим процессом, но одновременно и незаменимым при использовании кокса низкого

качества с высоким содержанием серы и азота. Хотя более экономичный метод Кастнера, или так называемое продольное графитирование было создано ранее, ее не применяли достаточно длительное время до создания электрических выпрямителей для большой силы тока. Доступность мощных выпрямителей и игольчатого кокса с низким содержанием серы и азота дали возможность развиваться во второй половине прошлого века продольного графитирования, которое стало стандартом в западном мире для производства графитированных электродов. Завод SGL Group в Италии (Асколи) был первым, начиная с 1960-х годов, который начал производить графитированные электроды методом Кастнера в промышленном масштабе [3].

Добавление оксида железа в качестве ингибитора, что приводит к снижению растрескивания электродов в процессе десульфуризации, в дальнейшем сократило время графитирования до 10 ч (рис. 1) [3, 8].

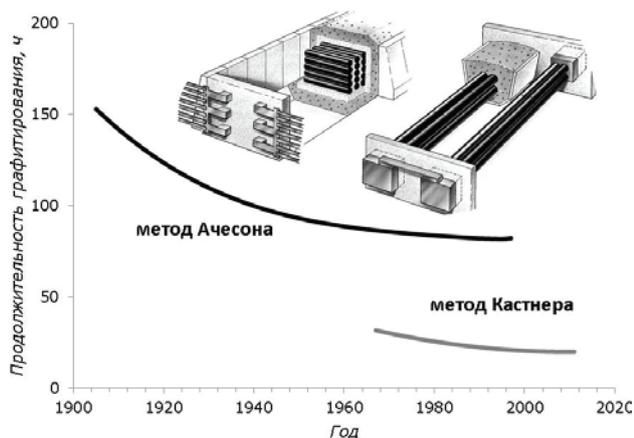


Рис. 1. Развитие различных технологий графитирования

Графитирование электродной продукции по методу Кастнера является наиболее перспективным способом получения качественных графитированных электродов больших размеров. Повышение технико-экономических показателей данного метода достигается с помощью исследования и совершенствования особенностей данной технологии и переоборудования частей конструкции печи.

На разных предприятиях, например, применяют собственные разработки по улучшению контактного сопротивления. Для этих целей применяются кольца с «гибкого графита», между контактными заготовками иногда засыпается стружка и т. д. Резистивные прокладки, обеспечивающие электрический контакт между углеродными заготовками во время кампании

графитирования, должны отвечать ряду специальных требований. В частности, они должны иметь по возможности высокую электропроводность, выдерживать значительные механические нагрузки при температурах 3000 °С и выше, препятствовать появлению высокоомного сопротивления в контактных участках свечи при изменении геометрии торцов заготовок [9].

Также ведется совершенствование системы охлаждения участков печи, подвергающихся действию сверхвысоких температур. К ним можно отнести боковые и разделительные стенки, шунтирующие электроды, токоподводы и др. Так, основными требованиями, которым должны соответствовать токоподводы, являются передача силового электропитания свечи и обеспечение надежного электроконтакта между заготовками свечи за период всей кампании графитирования путем приложения силового воздействия постоянной величины до наружного торца питающего электрода. При этом электрозатраты должны быть минимальными, а для обеспечения долговечности и надежности эксплуатации токоподводов за период многих кампаний температура их поверхностей, контактирующей с воздухом, не должна превышать 400–600 °С (что исключает возможность интенсивного окисления графита) [10].

Технология графитирования в печах Кастнер позволяет нагревать заготовки практически любой длины, обеспечивая однородность свойств материала по всей длине [7]. Это обстоятельство позволяет резко расширить ассортимент электродной продукции НР (high power — высокой мощности) и УНР (ultra high power — сверхвысокой мощности), что используется для ДСП высоких и сверхвысоких мощностей.

Дальнейшие перспективы развития дугового электроплавания, связанные с переходом на печи постоянного тока, будут применять электроды диаметром 700–800 мм и длиной до 2800 мм с удельным электрическим сопротивлением не более 5 мкОм·м [3]. Такую продукцию принципиально невозможно выпускать с помощью традиционных печей Ачесона. В табл. 1 представлены размеры и некоторые физические свойства крупнейших по размерам электродов, выпускаемых сегодня ведущими отечественными и зарубежными компаниями по изготовлению углеродной продукции.

Высокие цены на электроэнергию и глобальная конкуренция заставляют заводы и в дальнейшем улучшать эффективность выплавки стали. Печи с производительностью ниже 75 т/ч, скорее всего, исчезнут в ближайшее время [3]. Насколько можно спрогнозировать будущее, в ближайшее время не появится конкурентоспособной альтернативы технологии ДСП.

Таблица 1

Размеры и физические свойства крупнейших графитированных электродов, которые производят компании

Компания	Наибольший номинальный диаметр, мм	Наибольшая номинальная длина, мм	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Объемная плотность, г/см ³	Температурный коэффициент линейного расширения, мкм/(К·м)
SGL group	800	2700	4,0–5,5	1,68–1,77	0,3–0,6
GrafTech International	750	2700	4,0–4,9	1,67–1,75	0,2–0,5
Tokai Carbon Co.	800	2700	4,2–5,5	1,68–1,75	0,5–0,9
Группа Енергопром	700	2700	4,0–6,0	1,65–1,78	0,2–0,7
ПАО «Укрграфит»	700	2700	8,5	1,58	2,5

Примечание: данные взяты с официальных сайтов производителя по состоянию на март 2014 г.

Удельный расход электроэнергии при графитировании электродной продукции в ППН обычно не превышает 3500 кВт·ч/т, что на 15–25 % меньше, чем графитирование с помощью традиционных печей Ачесона. Еще в процессе графитирования методом Ачесона концы углеродных изделий всегда графитуются при более низкой температуре, чем соответственно центральная часть. Этот недостаток полностью отсутствует при продольном графитировании [7, 11].

Актуальность проблемы разработки технологии ППН с годами приобретает все большую остроту. Причина этого кроется как в более жестких требованиях металлургов к качеству электродов, причем в связи с разработкой новых, менее энергоемких способов производства искусственного графита, так и в сложности исследования высокотемпературных процессов, проходящих к тому же в очень агрессивной среде [12].

Основным источником тепловой энергии при плавке стали в электрометаллургическом процессе является электрическая дуга, которая горит непрерывно между шихтой (или расплавом металла) и электродной свечой, которая, как правило, состоит из одного или нескольких графитированных электродов. Поскольку часть стоимости электродов в себестоимости стали составляет примерно 8–10 %, то при стоимости графитированных электродов более 3000 долларов за тонну главным критерием оценки качества работы свечи, которая состоит из нескольких электродов, являются удельные затраты электродного материала, включенного в тонну выплавленной стали [13].

Компания SGL Group разработала компьютерную модель печи, с помощью которой можно прогнозировать расход графитированных электродов для различных ДСП эксплуатационных параметров, а также для различных диаметров графитовых электродов и физических свойств [14].

Расход графитовых электродов выражается в кг/т произведенной стали. В то время как расход графитированных электродов был около 7 кг/т в 1960 г., показатель был снижен в среднем почти до 1 кг/т на сегодняшний день (рис. 2). При специальных условиях эксплуатации показатели потребления могут составлять менее 1 кг/т [3, 15, 16]. Расход электродов главным образом уменьшается с увеличением его размеров [13, 17].

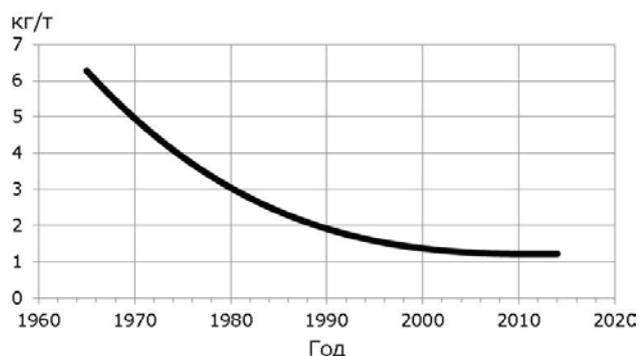


Рис. 2. Снижение расхода графитированных электродов

В условиях более высокой электрической мощности в ДСП стал необходимым больший диаметр электродов. Следствием этого стала повышенная термическая нагрузка в графитовых электродах. Принцип керамического укрепления, который препятствует распространению

трещин на больших частицах кокса, привел к необходимости применения кокса с большим размером частиц, используемый в производстве графитовых электродов. С расширением диаметра графитового электрода к ультра большому (700–800 мм) компания SGL была первой, которая изготовила графитовый электрод диаметром 800 мм (рис. 3), а максимальный размер частиц в наше время превышает 20 мм (рис. 4) [18].

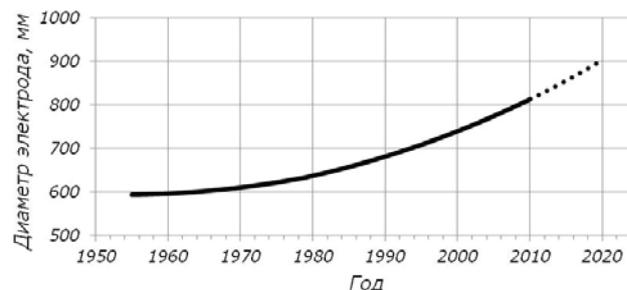


Рис. 3. Тенденции увеличения диаметра графитированных электродов

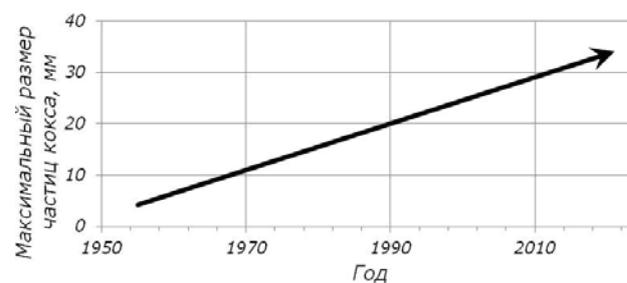


Рис. 4. Тенденции увеличения максимального размера зерен кокса

Дальнейшее увеличение диаметра графитированных электродов при применении постоянного тока несколько приостановилось в наши дни. Но тенденция к умеренному повышению диаметра может возникнуть в ближайшее время в новых крупных печах переменного тока с весом до 250 т [3].

5. Выводы

Современное состояние развития сверхмощных ДСП требует производства графитированных электродов больших размеров, высокого резистивного качества и однородности свойств по всей длине. Как показывает мониторинг рынка, указанные требования могут быть выполнены с наибольшей экономической выгодой лишь при изготовлении данной продукции в ППН методом Кастнера. Но данная технология в Украине еще не реализована, и это, прежде всего, связано с отсутствием значительных инвестиций в электродную промышленность. Однако, как показал анализ современного рынка по производству электродной продукции, ситуация меняется и возникают потребности в замене части печей графитирования в соответствии с новой технологией. По данному направлению уже ведутся научные исследования по возможности изготовления качественных резистивных прокладок в контактных соединениях свечей ППН, модернизации системы охлаждения участка печи, подвергающихся воздействию высокой термической нагрузки и т. д.

Литература

1. Шкуланов, Е. Е. Управление с настраиваемой моделью процессом графитации электродов в печи прямого нагрева [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Е. Е. Шкуланов. — Новочеркасск, 2001. — 150 с.
2. Makarov, A. N. Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces [Text] / A. N. Makarov, V. V. Rybakova, M. K. Galicheva // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. — 2014. — Vol. 6, № 7. — P. 184–192. doi:10.4236/jemaa.2014.67018.
3. Adams, R. Graphite electrode and needle coke development [Text] / R. Adams, W. Frohs, H. Jäger, K. Roussel // Carbon 2007 Conference, 15–20 July 2007, Seattle, Washington, USA. — Available at: \www/URL: http://acs.omnibooksonline.com/data/papers/2007_D031(K).pdf. — 19.07.2014.
4. Bai, E.-W. Minimizing Energy Cost in Electric Arc Furnace Steel Making by Optimal Control Designs [Text] / E.-W. Bai // Journal of Energy. — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–9. doi:10.1155/2014/620695.
5. Janerka, K. The carburizer influence on the crystallization process and the microstructure of synthetic cast iron [Text] / K. Janerka, D. Bartocha, J. Szajnar, J. Jezierski // Archives of Metallurgy and Materials. — 2010. — Vol. 55(3). — P. 851–859.
6. Панасенко, М. О. Маркетингові дослідження ринку вуглець-графітової вогнетривкої продукції як інструмент створення інформаційної бази для спеціалістів та виробників [Текст] / М. О. Панасенко, Л. О. Анголенко, Г. Д. Семченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. — 2010. — № 11. — С. 108–111.
7. Kuznetsov, D. M. A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods [Text] / D. M. Kuznetsov, V. K. Korobov // Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramik. — 2001. — Vol. 10. — P. 16–20.
8. Дыскина, Б. Ш. Об ингибировании вспучивания коксов добавками железа разной степени окисления [Текст] / Б. Ш. Дыскина // Весник ЮУрГУ. Серія: Металлургия. — 2007. — Т. 85, № 13. — С. 50–52.
9. Способ получения электроконтактной прокладки (варианты) [Текст]: Патент 2343112 С1 Рос. Федерация: МПК7 С 01 В 31/04, С 04 В 35/536/ С. Г. Ионон, А. А. Павлов, Д. В. Савченко и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «УНИХИМТЕК». — № 2007118260/15; заявл. 17.05.2007; опубл. 10.01.2009. — Режим доступа: \www/URL: http://www.freepatent.ru/patents/2343112.
10. Исследование теплоэлектрического и механического состояния критических узлов печи прямого нагрева [Текст]: отчет о НИР/НИЦ «РТ»; рук. Е. Н. Панов. — Инв. № 804/34069/68. — Киев, 2013. — 49 с.
11. Соседов, В. П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. — М.: Металлургия, 1987. — 187 с.
12. Санников, А. К. Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. — М.: Металлургия, 1985. — 129 с.
13. Маслов, Д. В. Разработка алгоритмов и систем управления дугowymi сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.09.10 / Д. В. Маслов. — М., 2014. — 135 с.
14. Friedrich, C. The world's first 800 mm diameter graphite electrode for a DC electric arc furnace [Text] / C. Friedrich, H. Jager, K. Wimmer et al // MPT International (Metallurgical Plant and Technology). — 2002. — P. 42–49.
15. Steel Recycling with Graphite Electrodes [Electronic resource] // 2nd German – Polish Symposium, October 16th 2013 TU Bergakademie Freiberg. — Available at: \www/URL: http://www.dkg.de/akk-vortraege/2013-_-2rd_polnisch_deutsches_symposium/abstract_steel-recycling.pdf. — 19.07.2014.
16. Макаров, А. Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания [Текст]. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках: монография / А. Н. Макаров. — Тверь: ТГТУ, 2007. — 184 с.
17. Borlée, J. Monitoring system for controlling and reducing the electrode consumption in DC EAF plants [Text] / J. Borlée, M. Wauters, C. Mathy et al. — Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. — 139 p.
18. Friedrich, C. Selecting the optimum electrode diameter for AC EAFs [Text] / C. Friedrich, H. Fuchs // MPT International (Metallurgical Plant and Technology). — 2005. — 38 p.

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ПЕЧЕЙ ГРАФІТУВАННЯ КАСТНЕРА В УМОВАХ ПОТРЕБ СУЧАСНОГО РИНКУ

Проаналізовано ефективність і доцільність застосування печей графітування Кастнера та потреби сучасного ринку з виробництва графітованих електродів. Розглянуто важливі фактори, що фундаментальним чином впливають на використання методу прямого нагріву при графітуванні електродної продукції. Показано основні тенденції розвитку нової технології на вітчизняному ринку.

Ключові слова: графітування, електродна продукція, дугова сталеливарна піч, піч прямого нагріву.

Панов Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: admin@rst.kiev.ua.

Педченко Анатолий Юрьевич, аспирант, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: anatolek@ukr.net.

Панов Євген Миколайович, доктор технічних наук, професор, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Педченко Анатолій Юрійович, аспірант, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Panov Yevgen, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: admin@rst.kiev.ua.

Pedchenko Anatoliy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: anatolek@ukr.net