

УДК 669.045

М.В. Коваль ⁽¹⁾, доцент
 В.К. Тарасов ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.
 С.С. Пилипенко ⁽²⁾, зав. кафедри, к.т.н., професор
 Ю.П. Єгоров ⁽¹⁾, професор, к.т.н.
 А.О. Власов ⁽¹⁾, ст. викладач

ПРО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,
⁽²⁾ Федеральний державний бюджетний вищий освітній заклад
 «Норильський індустріальний інститут», Російська Федерація,

Изучены причины разрушения графитовых электродов дуговых сталеплавильных печей и механических колебаний электрододержателей. Выполнены исследования напряженного состояния электродов в зависимости от воздействия электродинамических сил. Рассмотрены различные устройства для снижения вибрационных нагрузок на электроды и осуществлена их оценка.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрод, колебания, угар, поломки, надежность работы, устройства защиты

Вивчено причини руйнування графітових електродів дугових сталеплавильних печей і механічних коливань електродотримачів. Виконано дослідження напруженого стану електродів залежно від дії електродинамічних сил. Розглянуто різні пристрої для зниження вібраційних навантажень на електроди та здійснено їх оцінку.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електрод, коливання, вигар, поломки, надійність роботи, пристрої захисту

There are studied reasons of destruction of graphite electrodes for arc steel-smelting furnaces and mechanical vibrations of welding electrode holders. There are executed researches of the tense state for electrodes depending on action of electrodynamic forces. There are considered different devices for the decline of the oscillation loading on electrodes and their estimation is executed.

Keywords: arc steel-smelting furnace, electrode, vibrations, waste, breakages, reliability of work, devices of safety

Впровадження потужних дугових сталеплавильних печей (ДСП) вимагає корінного поліпшення якості графітових електродів, пов'язаної з підвищенням припустимої щільності струму від 15...20 до 30...32 кА/см², збільшенням їх механічної міцності та термічної стійкості, а також зниженням питомого електричного опору [1].

У структурі витрат щодо переділу в ДСП на частку електродів припадає до 15 % загальної величини, що спричинює необхідність розробки заходів, спрямованих на їх зниження. Одночасно вирішують питання щодо поліпшення якості та вдосконалення технології виготовлення електродів, зокрема, виробництва високощільних електродів [2].

Процеси, які визначають витрату електродів, поділяють на безперервні (окислення, сублімація й ерозія) та періодичні (обламування робочої частини, а також відколи через теплові удари). Для зниження безперервної витрати електродів застосовують захисні покриття металі-

зацією або іншими методами, а також роботу ДСП на довгих дугах з відповідним зниженням сили струму (зниження витрати графіту на робочій ділянці електроду), а також поєднання довгої дуги з пінистим шлаком (перешкода ерозії графіту бризками рідкого металу та стабільніше горіння дуги). На окислення бічної поверхні електродів суттєво впливають газодинамічні процеси, склад газової фази в об'ємі ДСП, а також ефективність роботи ущільнень електродних проміжків і системи відведення газів.

Статті щодо витрати електродів у ДСП подано у табл. 1.

Як видно з табл. 1, головна частина витрати електродів (37,7 %) доводиться на окислення їх бічної поверхні.

Зазначену величину втрат $G_{\text{ос}}$ можна обчислити за формулою:

$$G_{\text{ос}} = \frac{21,2 D_1 \cdot D_0}{P}, \quad (1)$$

де D_1 , D_0 – діаметр печі й електроду, відповідно, м; P – продуктивність печі, т/год.

Таблиця 1 - Баланс витрати графітових електродів у ДСП

Статті витрати графітованих електродів	Одиниці виміру	
	кг/т	%
Окислення бічної поверхні за дії температури	1,5645	37,7
Термомеханічне руйнування та знос	1,4608	35,2
Емісія за дією електричного поля	0,4107	9,9
Окислення торцевих частин	0,2782	6,7
Поломка від згинальних навантажень	0,1868	4,5
Руйнування графіту рідким металом	0,1204	2,9
Дія ударних і згинальних навантажень	0,1286	3,1
Повна витрата електроду	4,1500	100,0

Встановлено, що для 100-тонної ДСП довжина ділянки електроду, яка піддається окисленню, складає близько 6,0 м. За типових параметрів зазначеної печі: $D_1 = 6,75$ м; $D_0 = 0,55$ м і $P = 19,54$ т/год. мають $G_{\text{об}} = 4,03$ кг/т.

Періодичні процеси, які визначають витрату електродів, сприяють збільшенню непродуктивних простой та попаданню шматків графіту до розплаву, що знижує якість сталі й ефективність роботи ДСП.

Торцеві періодичні втрати, які обумовлено термічною, механічною та хімічною діями на нижню частину електроду, характеризуються створенням відколів, поперечних і поздовжніх тріщин. Це призводить до погіршення контактних властивостей ніпельного вузла, що примикає до робочої частини електроду, а також його обламування. Зазначеним втратам також сприяють нестійкий режим роботи ДСП та інтенсивна вібрація електродів. Окрім того, через різке збільшення механічних навантажень і розслаблення ніпельного вузла порушується надійність передавання струму, тому що контактні властивості ніпельного вузла визначаються точністю механічної обробки елементів з'єднання секцій електродів.

Зазначені втрати частіше спостерігають в умовах розвиненої конусності електроду, що є характерним для тривалого періоду рафінування металу, коли швидкість витрати бічної поверхні перевищує швидкість витрати робочої частини.

Періодичні втрати через поломки електродів пов'язані з їх складним напружено-деформованим станом, що залежить від швидкості де-

формації, температури та концентрації напружень. Найчастіше зустрічаються випадки поломки електроду в зоні ніпельного вузла, що примикає до голівки електродотримача.

Механічні навантаження на електроди обумовлено дією крутного моменту під час збирання секцій; дією температурного градієнта у поздовжньому та радіальному напрямках; термічними ударами під час підйомів; відмінністю коефіцієнтів теплового розширення матеріалу ніпеля й електроду; електродинамічними ударами під час обвалів шихти та прискоренням під час розгону та гальмування системи їх переміщення, а також силою тяжіння самого електроду.

Всі дії, поділяють на вібраційні, ударні, статичні та лінійні. Найбільшу небезпеку представляють вібраційні й ударні дії. Дослідженнями встановлено, що вібраційні навантаження електродів 100-тонних ДСП складають 8...10 кН і мають знакозмінний характер, що знижує міцнісні характеристики їх матеріалу.

Напруження, які виникають в електроді, залежать від значення, форми та часу дії сил, їх періодичності і частоти, а також точки прикладення результуючого зусилля. Розрахункову схему електроду подано на рис. 1.

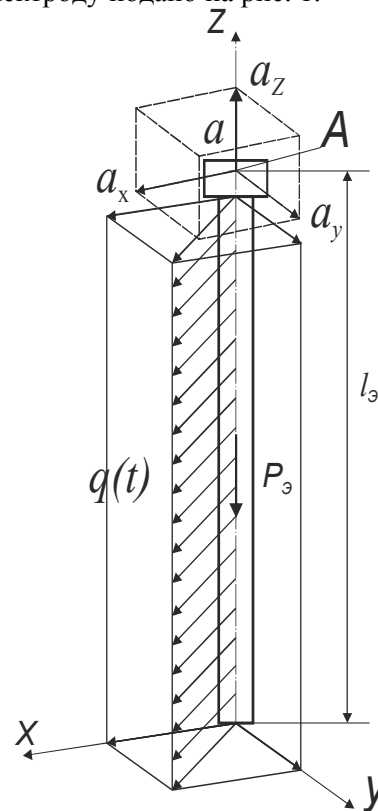


Рисунок 1 - Розрахункова схема електроду

На електрод діють електродинамічна сила інтенсивністю $q(\tau)$ і навантаження, що обумовлено кінематичним збудженням з прискоренням

a (a_x, a_y, a_z) в точці закріплення за рахунок коливань його пружної системи, які можна замінити на силу інерції $F_i(F_{ix}, F_{iy}, F_{iz})$, а також сила його тяжіння P_e .

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 1) електрод зазнає сумісної дії вигину з розтягуванням (стисканням). Оскільки вигин створюється поперечними силами, у перерізі електроду діють як нормальні, так і дотичні напруження. Внаслідок того, що співвідношення діаметра електроду до його довжини для ДСП складає 1:7...8, дотичні напруження є незначними та обчислення на міцність виконують тільки щодо нормальних

напружень. Для визначення небезпечного перерізу було побудовано епюри подовжньої сили N_z , згинальних моментів M_{xz} і M_{yz} у двох взаємно перпендикулярних площинах і сумарного згинального моменту $M_{виз} = (M_{xz}^2 + M_{yz}^2)^{0,5}$.

Встановлено, що небезпечним є переріз у точці А з координатою $z = \ell_{el}$.

Оскільки електрод виконано з крихкого матеріалу розрахунки на його міцність слід виконувати для точок з найбільшим стискальним ($\sigma_{\max,c}$) і розтягальним ($\sigma_{\max,p}$) напруженням:

$$\sigma_{\max,c} = 0,25\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell \cdot (1 \pm A_z \cdot \omega_z^2/g) - \left\{ \frac{[0,5q_x \cdot \ell \pm 0,125(\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell^2 \cdot A_x \cdot \omega_x^2/g)^2]^2}{10D^2} + \frac{[-0,5q_x \cdot \ell \pm 0,125(\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell^2 \cdot A_x \cdot \omega_x^2/g)^2]^2}{10D^2} \right\}^{0,5} \leq [\sigma_c] \quad (2)$$

$$\sigma_{\max,c} = 0,25\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell \cdot (1 \pm A_z \cdot \omega_z^2/g) - \left\{ \frac{[0,5q_x \cdot \ell \pm 0,125(\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell^2 \cdot A_x \cdot \omega_x^2/g)^2]^2}{10D^2} + \frac{[-0,5q_x \cdot \ell \pm 0,125(\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot \ell^2 \cdot A_x \cdot \omega_x^2/g)^2]^2}{10D^2} \right\}^{0,5} \leq [\sigma_p], \quad (3)$$

де D, ℓ – діаметр і довжина електроду, відповідно; ρ – щільність матеріалу електроду; A_x, A_y, A_z $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – амплітуда та частота коливань точки закріплення електроду за осями x, y і z , відповідно; σ_c, σ_p – допустимі значення стискального та розтягального напружень, відповідно.

Результати розрахунків максимальних значень стискальних і розтягальних напружень еле-

ктродів для ряду промислових печей подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків максимальних напружень електродів

Найменування параметра	Серія печі			
	ДСП-25Н2	ДСП-50Н2	ДСП-100Н3А	ДСП-100И6
Діаметр електроду, м	0,4	0,5	0,6	0,6
Довжина електроду, м	3,0	3,6	4,5	4,5
Максимальне стискальне напруження, МПа	28,5	45,6	33,4	32,0
Максимальне розтяжне напруження, МПа	27,6	44,2	32,6	30,8

Примітка: $[\sigma_c] = 23,0$ МПа; $[\sigma_p] = 6,0$ МПа

Як видно з табл. 2, максимальні значення напружень, що розвиваються в електродах ДСП зазначених серій, перевищують допустиму величину й особливо за зусиллям розтягального характеру.

Для зниження амплітуди коливань системи електродотримача ДСП розроблено демпферні роликові опори, які мають нелінійну пружну характеристику [3] та сприяють інтенсивнішому розсіюванню енергії коливань, що суттєво знижує амплітуду їх коливань у резонансних режимах.

Запропоновано також конструкції динамічних погашувачів коливань систем електродотримачів [4-7], які забезпечують перерозподіл коливальної енергії від системи електродотримачів до інерційної маси та її розсіювання.

Пристрої для демпфування та динамічного гасіння коливань системи електродотримача впроваджено на ряду діючих дугових електропечей серії ДСП-25Н2, ДСП-50Н2 і ДСП-100ЗА, що дозволило понизити вібрацію електродів до допустимих меж і внаслідок цього скоротити їх поломку та тривалість плавлення шихти.

Експлуатаційні властивості електродів визначаються щільністю, міцністю на вигин, модулем пружності, питомим електричним опором і коефіцієнтом термічного розширення матеріалу електрода, причому вирішальний вплив на якість електродів чинить щільність графіту [8]. Мінімального окислення бічної поверхні забезпечують електроди, виконані з графіту високої щільності та малої пористості, проте під час підвищення щільності графіту спостерігають зниження його термостійкості. Кращу стійкість мають графітові електроди з великою зернистою структурою. Характеристика вказаних електродів вітчизняного та зарубіжного виробництва наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Властивості вітчизняних (I) і зарубіжних (II) графітових електродів

Показник	Чисельні значення	
	I	II
Щільність, кг/см ³	2,20	1,66...1,73
Питомий електричний опір, Ом мм ² /м	6,1...8,6	4,5...6,0
Межа міцності на згин, Па	60,0	110...140

Нижча щільність зарубіжних електродів пояснюється вимогами термостійкості, а малий питомий електричний опір (майже в 1,5 разів менше ніж для вітчизняних) сприяє зниженню втрат електроенергії, зменшенню температури нагрівання, а, отже, і пониженню міри окислення бічної поверхні.

Зниження втрат на окислення досягають застосуванням просочення, а також нанесення покриття для захисту поверхні графіту в інтервалі температур 600...2900 °С. Недоліком покриттів є необхідність застосування змінних графітових вкладишів для запобігання хімічній взаємодії між контактуючими поверхнями. Окрім того, покриття не мають достатньої стійкості та потребують нанесення після кожної плавки.

Застосування струминного охолодження графітових електродів [9] передбачає подавання водяної плівки на поверхню електрода, яка піддається дії пічної атмосфери, при цьому знижується кількість води, що подають на охолодження електрода, а також забезпечується оптимальне поєднання класичних графітових електродів з водяним охолодженням. Найбільшого поширення набула розробка фірми «Системотехніка» (Німеччина) [10], яка відрізняється жорстким закріпленням кільцевих водяних сопел і з'єднанням підведення води з системою охолодження рукава. Проте вертикальне переміщення електрода супроводжується зменшенням натиску рідини, що суттєво знижує ефективність охолодження; окрім того, виникає ймовірність поломки кільцевих водяних сопел під час установки електрода.

Вказані недоліки було усунуто у конструкції пристрою для зрошування електрода [11,12], де передбачають шарнірне закріплення 2 кільцевого водяного сопла 1 на кронштейні 3 (рис. 2).

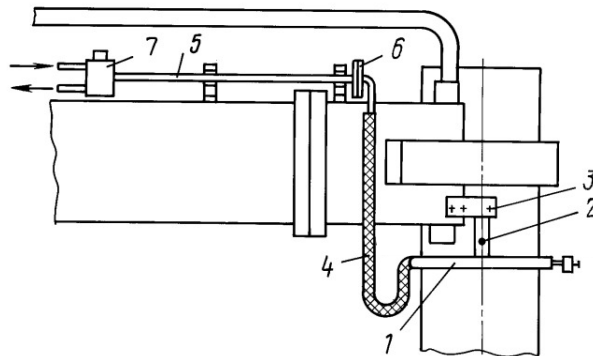


Рисунок 2 - Пристрій для зрошування графітових електродів (позначення у тексті)

Особливість його полягає у приєднанні напірного золотника 7 до кільцевого водяного сопла 1 за допомогою металевих рукава 4, трубопроводу 5 та роз'ємного фланцевого з'єднання 6. З іншого боку, золотник 7 підключено як до напірної, так і зливної магістралі. У разі упирання електрода шарнірне закріплення кільцевого сопла та наявність протитяги дозволяють йому відхилити сопло та вільно переміщатися вниз, з наступним поверненням сопла у початкове горизонтальне положення за допомогою системи урів-

новаження. Робота золотника забезпечує постійну величину витрати рідини незалежно від положення електроду.

За лабораторних умов було виконано успішні випробування запропонованого пристрою, а також розроблено його технічного проекту для ДСП місткістю 100 т.

Висновок. Визначено причини низької стійкості електродів ДСП. Розроблено розрахункову схему для визначення напруженого стану електродів залежно від механічних навантажень. Запропоновано пристрій для зниження шкідливих коливань електродотримачів ДСП, а також для зменшення втрат від вигару бічної поверхні графітових електродів.

Бібліографічний список

1. **Toulouevski, Y.** Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection [Text] / Y Toulouevski, I. Zinurov. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 258 p. – Bibliog.: p. 254-258. – 2000 copy.
2. **Герцык, С. И.** Пути снижения расхода электродов при выплавке стали в дуговых печах [Текст] / С. И. Герцык // Черная металлургия. – 1989. – Вып. 2. – С. 16-24. – Библиогр.: с. 23-24.
3. **А. с. 1775877 СССР, МПК Н 05 В 7/00.** Электрод дуговой электропечи [Текст] / В. К. Тарасов, В. Н. Каянюк, О. Л. Резников ; заявитель Запорожская государственная инженерная академия. – 4801955/07; 48027675/07; заявл. 15.03.1990; опубл. 15.11.1992. Бюл. № 42.
4. **А. с. 1346884 СССР, МПК Н 05 В 7/10.** Инерционная масса для гашения колебаний [Текст] / Н. В. Коваль, А. И. Сапко, Н. В. Шматченко и др. ; заявитель Запорожская государственная инженерная академия. – 4036291/24-07; заявл. 24.12.1985.; опубл. 23.10.1987. – Бюл. № 39.
5. **Коваль, Н. В.** [Текст] / Н. В. Коваль, А. Я. Жук, А. А. Власов и др. // Металлургия : научные труды Запорожской государственной инженерной академии. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2000. – Вып. 3. – С. 141-145. – Библиогр.: с. 145.
6. **А. с. 1758915 СССР, МПК Н 05 В 7/10.** Электродержатель дуговой электропечи [Текст] / В. К. Тарасов, О. Л. Резников, И. А. Лапиков ; заявитель Запорожская государственная инженерная академия и малое государственное предприятие «Пионер». – 4939042/07; заявл. 22.05.1991; опубл. 30.09.1992. – Бюл. № 32.
7. **А. с. 1769387 СССР, МПК Н 05 В 7/10.** Электродержатель дуговой электропечи [Текст] / В. К. Тарасов, О. Л. Резников, А. Я. Жук и др. ; заявитель Запорожская государственная инженерная академия и малое государственное предприятие «Пионер». – 4995627/07; заявл. 28.09.1991; опубл. 30.11.1992. – Бюл. № 40.
8. **Воденников, С. А.** Аналіз методів захисту графітових електродів дугових печей від поверхневого окислення [Текст] / С. А. Воденников, І. Є. Лукошніков, О. Р. Бережна та ін. // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2005. – Вип. 12. – С. 118-125. – Библиогр.: с. 124-125.
9. **Цельнер, А.** Совершенствование конструкции водоохлаждаемых электродов [Текст] / А.Цельнер, К.-Д. Унгер. // Черные металлы. – 1988. – № 23. – С. 15-16.
10. **Пат. 2007896 Российская Федерация, МПК Н 95 В 7/12.** Устройство орошения электрода дуговой сталеплавильной печи [Текст] / В. К. Тарасов, О. Л. Резников, Ю. И. Корченков ; патентообладатель малое государственное предприятие «Пионер» –. заявл. 31.03.1993 ; опубл. 15.02.1994. – Бюл. № 3.
11. **Тарасов, В. К.** Повышение стойкости графитированных электродов рудотермических печей [Текст] / В. К. Тарасов, А. Я. Жук // Состояние, проблемы и направления развития производства цветных металлов в Украине : сборник научных трудов. – Запорожье : ЗГИА, 1997. – С. 387-390. – Библиогр.: с. 390. – 200 экз. – ISBN 966-7101-13-4.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2016 р.
Рецензент, проф. В.О. Ніколаєв

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>