

П. А. Ливаткин, аспирант, PAL2010@yandex.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
К. А. Положенцев, аспирант, kirill.polozhentsev@gmail.com,
СТИ НИТУ МИСиС, Московская область, г. Электросталь

Метод оценки скорости переплава расходуемого электрода с использованием лазерного дальномера при управлении вакуумным дуговым переплавом

Предложен метод оценки скорости плавления расходуемого электрода вакуумного дугового переплава, основанный на использовании установленных на смотровые окна печи лазерных дальномеров. Последние позволяют определить объем переплавленного электрода, зная который в предыдущий и текущий моменты времени, и можно определить скорость, с которой идет переплав.

Ключевые слова: вакуумная дуговая печь, объем слитка, объем электрода, скорость переплава, лазерный дальномер, аппроксимация электрода, время замеров, высота слитка, масса слитка, радиус электрода

Скорость переплава является важнейшим технологическим параметром вакуумного дугового переплава (ВДП), отвечающим за кристаллическую структуру слитка, распределение и содержание в ней неметаллических включений.

Изменение скорости переплава позволяет выявить ряд технологических особенностей текущего ВДП, а именно:

1) изменение скорости переплава свидетельствует об увеличении длины электрической дуги, уменьшении межэлектродного промежутка и увеличении тока утечки с возникновением боковых "паразитных" дуг на стенке кристаллизатора, которые могут прожечь его и вывести из строя установку;

2) уменьшение скорости переплава говорит об увеличении напряжения печи, росте межэлектродного промежутка и увеличении тепловых потерь;

3) возможное изменение скорости переплава при понижении напряжения печи способствует возникновению кратковременных коротких капельных замыканий, из-за чего снижается мощность электрической дуги.

Поэтому оценка скорости переплава расходуемого электрода очень важна. С ее помощью определяются важные технологические величины: межэлектродный промежуток и изменение длины электрической дуги.

Вакуумный дуговой переплав

Поддержание желаемой скорости переплава расходуемого электрода (СПРЭ) позволяет получать равномерную скорость наплавления слитка вакуумного дугового переплава, что, в свою очередь, повышает физические свойства и структуру получаемого металла.

Схема вакуумной дуговой печи приведена на рис. 1.

Вакуумная дуговая (ВД) печь — электрическая печь для переплавления металлов в вакууме энергией электрической дуги. Вместе с тем ВД печь — газоразрядная система, где электрическая дуга существует на поверхностях переплавляемого металла и

получаемого слитка (3). Переплавляемый электрической дугой металл называют электродом (5). Он крепится к подвижному механическому штоку 2. Для вертикального перемещения штока с зажатым электродом печь имеет электродвигатель постоянного тока (ДПТ) 1. При подаче постоянного тока между электродом (катод) и кристаллизатором (анод) возникает электрическая дуга. Выделяющаяся теплота расплавляет электрод, жидкий металл стекает в кристаллизатор 4, образуя слиток.

Автоматическое управление ВД печью представляет сложную систему, которая зависит от ряда параметров, таких как скорость переплава, масса слитка, межэлектродное расстояние и т. д.

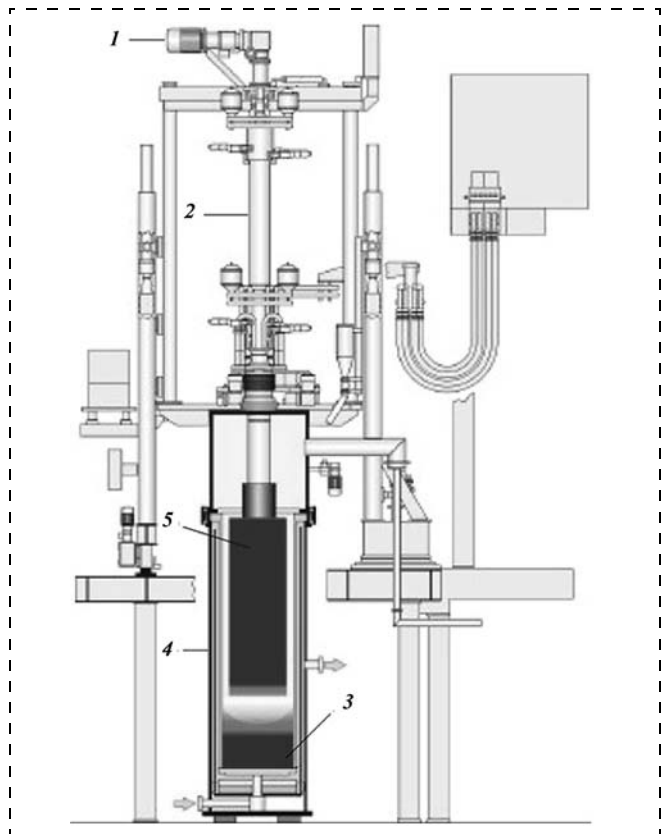


Рис. 1. Схема ВД печи

Процесс управления вакуумным дуговым переплавом строится за счет поддержания заданного межэлектродного промежутка и желаемой скорости плавления расходуемого электрода.

На сегодняшний момент известны два способа "прямого" измерения СПРЭ: по измерению массы расходуемого электрода и наплавляемого слитка и по частоте капельных импульсов.

В рассмотренных работах [7, 9] скорость переплава находится с помощью установленных на печи массовых датчиков. Большое число иностранных и российских фирм используют способы определения СПРЭ, приведенные в работах [7, 9]. На этом принципе построено определение скорости плавления расходуемого электрода у германской фирмы ALD и американской Consarc.

На ВД печах фирмы ALD массовый датчик устанавливают на шток с расходуемым электродом для определения текущей скорости переплава, которую находят из следующего выражения:

$$v_{\text{п}}^{\text{ALD}}(t) = \frac{w_{\text{сг}}}{\Delta t},$$

где Δt — время, в течение которого измеряют скорость переплава; $w_{\text{сг}}$ — масса сгоревшего за время Δt остатка.

Американская фирма Consarc использует четыре опоры для поддержания электрода. В эти четыре опоры устанавливаются массовые датчики для измерения массы расходуемого электрода.

Масса электрода находится по формуле

$$w(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(t)}{4},$$

где $w(t)$ — суммарная масса электрода; $w_i(t)$ — масса электрода, которая получена каждым массовым датчиком.

Скорость переплава электрода

$$v_{\text{п}}^{\text{Cons}}(t) = \frac{\Delta w}{\tau},$$

где $v_{\text{п}}^{\text{Cons}}(t)$ — скорость переплава электрода; Δw — изменение текущей массы электрода; τ — промежуток времени.

Определение скорости переплава по частоте капельных импульсов [10] основывается на определении условной массы капли жидкого металла, стекающего с электрода, как отношения массы сплавленной части электрода за достаточно большой период времени к общему числу капельных импульсов напряжения печи, прошедших за это время.

Учитывая ошибки при измерении массы расходуемого электрода и трудности выделения капельных импульсов от коротких замыканий, целесообразно использовать эти два способа одновременно.

Метод лазерной велосометрии оценки СПРЭ

Как найти скорость переплава, если установить массовые датчики нельзя из-за конструктивных особенностей ВД печи, а частота капельных импульсов сильно зашумлена?

В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается ВД печь типа ДВС-320-Г1, разработанная в СССР [2–4]. Установка массовых датчиков не представляет возможным определить объем наплавленного слитка и текущий объем электрода. Это связано с конструктивными особенностями печи:

1) установка массового датчика на штоке не позволяет измерять с достаточной точностью ввиду трения между штоком и уплотнительными кольцами (± 100 кг);

2) установка массового датчика под кристаллизатор невозможна в связи с трением между штоком и уплотнительными кольцами, а также из-за изменяющегося протока воды в охлаждающих контурах кристаллизатора [5, 6];

3) установка массового датчика внутри кристаллизатора (под слитком) невозможна из-за высоких температур и необходимости поддержания вакуума [6, 7].

Частоту капельных импульсов трудно определить из-за высокой стоимости датчиков капельных импульсов.

Решением данной проблемы является метод оценки СПРЭ. Метод основан на установке на смотровые окна ВД печи двух лазерных дальномеров (ЛД), измеряющих расстояние сначала до дна кристаллизатора, а затем до верхней части наплавляемого слитка. Сигнал с ЛД поступает на блок сбора и обработки сигналов, а затем в контроллер ВД печи. Снимая показания с двух ЛД и находя среднее значение расстояния, определяем текущее положение наплавляемого слитка с точностью до 1 мм:

$$l_{\text{д.с}}(t) = \frac{l_{\text{д1}}(t) + l_{\text{д2}}(t)}{2},$$

где $l_{\text{д.с}}$ — среднее значение длины до слитка; $l_{\text{д1}}$, $l_{\text{д2}}$ — значение длины с первого и второго дальномеров до слитка соответственно.

Схема ВД печи с ЛД приведена на рис. 2.

Вакуумная камера состоит из верхней части 1 и нижней части (кристаллизатора) 2. Во время наведения "жидкой" ванны происходит начало наплавления слитка 3. При переплаве расходуемого электрода 4 увеличивается уровень наплавляемого слитка. Путем перемещения штока 5 с расходуемым электродом осуществляется регулирование межэлектродного расстояния. С помощью лазерных дальномеров 6 определяются расстояния сначала до дна кристаллизатора, а затем до слитка, которые передаются обработчику сигнала с дальномеров.

Среднее значение расстояния до дна кристаллизатора в начальный момент времени находится из следующего выражения:

$$l_{\text{д.с}}(0) = \frac{l_{\text{д1}}(0) + l_{\text{д2}}(0)}{2}.$$

Усредненное значение длины в момент времени t

$$l_{\text{д.уср}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t l_{\text{д.с}}(t) dt,$$

где $l_{\text{д.уср}}$ — усредненное значение длины; t — текущее время; T — время усреднения значений.

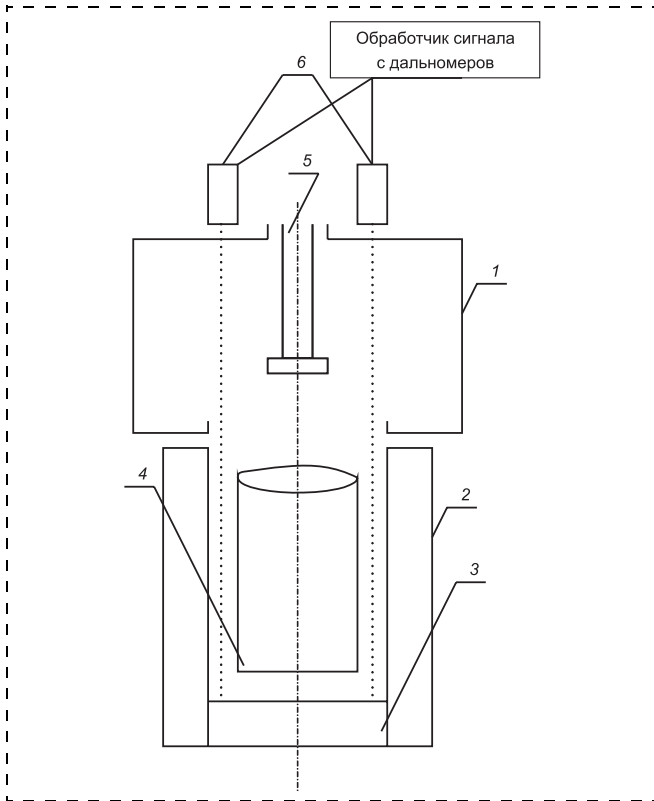


Рис. 2. Схема ВД печи с ЛД

Чтобы найти высоту образующейся слитка, воспользуемся следующей формулой:

$$h_{\text{сл}}(t) = h_{\text{кр}} - l_{\text{д.уср}}(t),$$

где $h_{\text{сл}}(t)$ — высота образующейся слитка; $h_{\text{кр}}$ — длина до дна кристаллизатора.

Текущий объем слитка будет равен [2, 8, 9]

$$V_{\text{сл}}(t) = \pi R^2 h_{\text{сл}}(t),$$

где $V_{\text{сл}}(t)$ — текущий объем слитка; R — радиус кристаллизатора.

Для определения участка аппроксимации электрода по программному управлению будем последовательно вычитать из объема наплавляемого слитка объемы участков аппроксимируемого электрода до тех пор, пока оставшийся объем слитка не окажется меньше объема участка аппроксимируемого электрода, и после этого найдем текущий радиус электрода:

$$\sum_{i=1}^n \pi r_i^2 l_{\text{э}i} < V_{\text{сл}} < \sum_{i=1}^{n+1} \pi r_i^2 l_{\text{э}i}, \quad (1)$$

где r_i — радиус электрода на i -м ($i = \overline{1, n}$) интервале аппроксимации; $l_{\text{э}i}$ — длина электрода на i -м ($i = \overline{1, n}$) интервале аппроксимации.

Из неравенства (1) найдем текущее значение радиуса электрода $r_{\text{э}}(t)$:

$$r_{\text{э}}(t) = r_n.$$

Зная объем слитка, можно определить текущую массу слитка [2, 10, 11]:

$$m_{\text{сл}}(t) = V_{\text{сл}}(t)\rho,$$

где $m_{\text{сл}}(t)$ — масса слитка; ρ — плотность слитка.

Текущая масса электрода равна

$$m_{\text{эл}}(t) = m_{\text{эл}}(0) - m_{\text{сл}}(t),$$

где $m_{\text{эл}}(0)$ — начальная масса электрода.

Определив массу в текущий и предыдущий моменты времени, получаем скорость переплава электрода:

$$v_{\text{пер}}(t) = \frac{V_{\text{эл}}(t + \Delta t) - V_{\text{эл}}(t)}{\Delta t},$$

где $v_{\text{пер}}(t)$ — скорость переплава; $V_{\text{эл}}(t)$ — объем расходуемого электрода; Δt — приращение времени.

Исходя из полученных значений массы расходуемого электрода и скорости переплава электрода, корректируем скорость переплава расходуемого электрода, изменяя мощность ВД печи [12, 13].

Ошибка скорости переплава определяется выражением

$$\varepsilon_v(t) = \frac{|v_{\text{п.ж}}(t) - v_{\text{п}}(t)|}{v_{\text{п.ж}}(t)}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_v(t)$ — ошибка скорости переплава (%), $v_{\text{п.ж}}(t)$ — желаемая скорость переплава (задается технологами).

Вместе с тем, скорость переплава определяется следующим образом [14]:

$$v_{\text{пер}}(t) = \frac{m_{\text{эл}}(t)}{t_{\text{пл}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{пл}}$ — время между замерами.

Запишем выражение (2) в следующем виде, используя (3):

$$\varepsilon_m(t) = \frac{|m_{\text{эл.ж}}(t) - m_{\text{эл}}(t)|}{m_{\text{эл.ж}}(t)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_m(t)$ — ошибка массы электрода; $m_{\text{эл.ж}}(t)$ — желаемая масса электрода (задается технологами).

Тогда

$$m_{\text{э}}(t) = m_{\text{эл.ж}}(t) - m_{\text{эл}}(t) —$$

погрешность между желаемым и текущим значениями массы электрода.

Тогда выражение (4) можно представить в виде

$$\varepsilon_m(t)m_{\text{эл.ж}}(t) = |m_{\text{э}}(t)|. \quad (5)$$

Погрешность масс можно записать следующим образом:

$$m_{\text{э}}(t) = \rho V_{\text{э}}(t), \quad (6)$$

где $V_{\text{э}}(t)$ — погрешность объема, которая может быть найдена по формуле [15, 16]

$$V_{\text{э}}(t) = \pi R^2 h_{\text{э}}(t), \quad (7)$$

где $h_{\text{э}}(t)$ — погрешность высоты слитка, которая определяется с помощью дальномеров и принимается как максимальная погрешность с дальномеров, равная 0,002 м.

В выражение (5) подставим (3), (6) и (7):

$$\varepsilon_m(t)v_{\text{п.ж}}(t)t_{\text{пл}} = |\rho\pi R^2 h_{\text{э}}(t)|. \quad (8)$$

Выразим $t_{пл}$ из (8):

$$t_{пл} = \frac{\rho \pi R^2 |h_{\varepsilon}(t)|}{\varepsilon_m(t) v_{п.ж}(t)}$$

Время между замерами для всех сплавов, переплавляемых ВД печью ДВС-320-Г1 на АО "Металлургический завод "Электросталь", составляет 4 мин. За рассчитанное время скорость переплава изменяется незначительно, так что разработанная система позволяет поддерживать скорость переплава на желаемом уровне.

Экспериментальная апробация метода оценки СПРЭ

Промышленная применимость метода оценки СПРЭ подтверждается следующими экспериментами.

Эксперимент № 1. Осуществляли выплавку слитка из сплава ПШРЗ ЭП718 диаметром 320 мм и массой 670 кг в вакуумной дуговой печи ДВС-320-Г1. Расходуемый электрод диаметром 250 мм помещали на поддон кристаллизатора диаметром 320 мм. После вакуумирования возбуждали электрическую дугу между поддоном кристаллизатора и нижним торцом электрода, устанавливали дуговой зазор 20 мм. Расстояние от смотрового окна до поддона кристаллизатора составляло 3800 мм. Далее в течение 5 мин проводили прогрев расходуемого электрода при токе 2,5 кА. Затем в течение 6 мин происходило повышение тока до 5 кА и наведение "жидкой" ванны. При наведении "жидкой" ванны расстояние от смотрового окна до поверхности образующегося наплавляемого слитка изменялось и становилось равным 3795 мм. При этом теоретическое значение массы электрода падало с 677 до 670 кг. Далее выходили на рабочий режим переплава при токе 3,8 кА. Через полчаса плавления на основном режиме останавливали переплав, остужали, вынимали и взвешивали электрод. Масса электрода составила 598 кг, а расстояние до образующегося слитка было равно 3696 мм. Следовательно, слиток увеличился на 101 мм. Таким образом, получаем, что скорость переплава составляет примерно 2,2 кг/мин. Начинали плавить оставшуюся часть электрода и через час плавления снова останавливали печь, вынимали электрод, взвешивали его и получали массу электрода, равную 465 кг, при этом слиток увеличился на 198 мм. Зная, на сколько уменьшилась масса расходуемого электрода, найдем скорость переплава, равную 2,2 кг/мин. Провели измерение высоты слитка через 3 ч: слиток увеличился на 597 мм, а расстояние до образующегося слитка стало равным 2968 мм. Снова подсчитали скорость и получили 2,2 кг/мин. Отсюда получается, что переплав расходуемого электрода, а следовательно, и скорость натекания наплавляемого слитка идут с равной скоростью в течение всего переплава.

Эксперимент № 2. Осуществляли выплавку слитка из сплава 08X18N10 диаметром 320 мм и массой 935 кг в вакуумной дуговой печи ДВС-320-Г1. Расходуемый электрод диаметром 250 мм помещали на поддон кристаллизатора диаметром 320 мм. После

вакуумирования возбуждали электрическую дугу между поддоном кристаллизатора и нижним торцом электрода, устанавливали дуговой зазор 20 мм. Расстояние от смотрового окна до поддона кристаллизатора составляло 3800 мм. Далее в течение 5 мин проводили прогрев расходуемого электрода при токе 2,5 кА. Затем в течение 6 мин происходило повышение тока до 7,5 кА и наведение "жидкой" ванны. При наведении "жидкой" ванны расстояние от смотрового окна до поверхности образующегося наплавляемого слитка изменялось и становилось равным 3730 мм. При этом теоретическое значение массы электрода падало с 935 до 931 кг. Далее выходили на рабочий режим переплава при токе 5,5 кА. Через полчаса плавления на основном режиме снимали значение массы электрода, которое составляло 798 кг. Измеряя расстояние до образующегося слитка, получали значение длины 3520 мм. Следовательно, слиток увеличился на 210 мм. Таким образом, получаем, что скорость переплава составляет примерно 4,45 кг/мин. Через час плавления расходуемого электрода слиток увеличился на 420 мм, а масса расходуемого электрода уменьшилась до 534 кг. Зная, на сколько уменьшилась масса расходуемого электрода, найдем скорость переплава, которая составит 4,5 кг/мин. Провели измерение высоты слитка через 2 ч. Слиток увеличился на 846 мм, а расстояние от смотрового окна до образующегося слитка стало равным 2254 мм. Таким образом, скорость стала 4,5 кг/мин. Отсюда получается, что переплав расходуемого электрода, а следовательно, и скорость натекания наплавляемого слитка идут с равной скоростью в течение всего переплава.

Эксперимент № 3. Для дополнительной апробации работы метода оценки СПРЭ система с дальномерами была установлена на вакуумную дуговую печь ALD на АО "Металлургический завод "Электросталь". Поскольку на печи ALD установлена система по определению скорости переплава с использованием массового датчика, сравним полученные данные с методом оценки СПРЭ, приведенным в данной работе. Была проведена выплавка слитка сплава 08X18N10 диаметром 320 мм. Данные снимали через 1 ч после выхода печи на рабочие значения в установившемся режиме работы.

График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью массовых датчиков, приведен на рис. 3.

Полученная скорость переплава (рис. 3) составляет около 4,32 кг/мин, что на 0,18 кг/мин меньше желаемой скорости переплава для данного сплава.

График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью метода оценки СПРЭ, приведен на рис. 4.

Полученная скорость переплава (рис. 4) составляет около 4,32 кг/мин, что на 0,18 кг/мин меньше желаемой скорости переплава для данного сплава.

Скорость переплава, полученная с помощью метода оценки СПРЭ, совпадает со скоростью переплава, полученной с помощью массового датчика.

Благодаря разработанному методу оценки СПРЭ (метод лазерной велосометрии) решается актуаль-

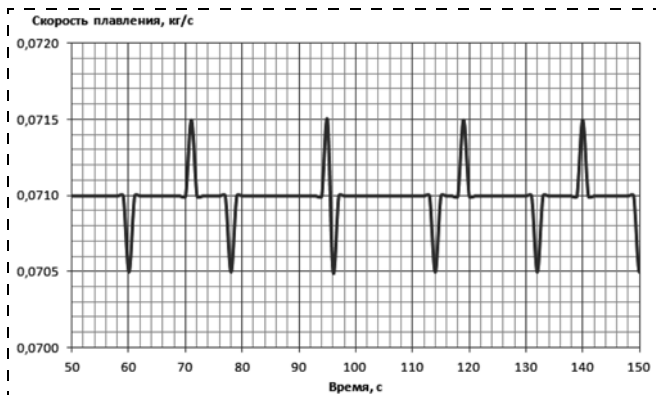


Рис. 3. График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью весовых датчиков

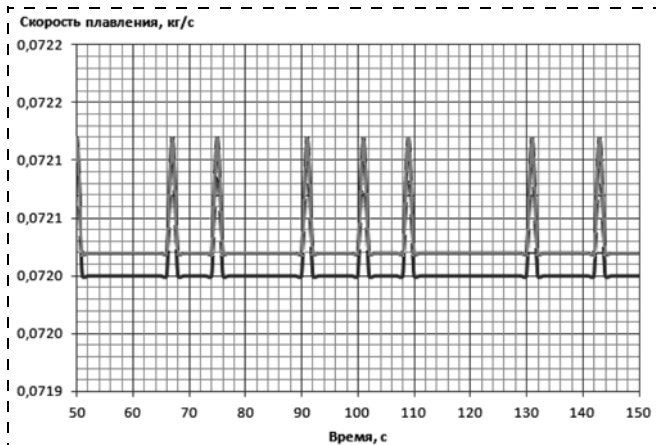


Рис. 4. График скорость переплава, снятый с печи ALD с помощью метода оценки СПРЭ (показания с двух ЛД)

ная задача поддержания желаемой скорости плавления расходоуемого электрода при вакуумном дуговом переплаве на старых типах печей, которые из-за своих конструктивных особенностей не позволяют использовать весовые датчики или способ определения по частоте коротких замыканий. Метод оценки СПРЭ позволяет, не закупая новых ВД печей, проводить переплав современного сортамента сталей высокого качества с низким процентом брака, что очень актуально ввиду сложившейся экономической обстановки в стране.

Список литературы

1. Положенцев К. А., Ливаткин П. А., Александров А. Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 1 // Известия вузов: Черная металлургия. 2015. № 3. С. 203–206.
2. Лапшин И. В. Автоматизация дуговых печей. М.: Издательство МГУ, 2004. 165 с.
3. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.
4. Ташкинов А. Ю. Разработка математических моделей и алгоритмов и их применение для исследования и усовершенствования процессов вакуумного дугового переплава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2003. 21 с.
5. Нехамин И. С. Разработка системы управления дуговой печью постоянного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 20 с.
6. Фомин А. В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Изв. тульского госуд. университета. Техн. науки. 2009. № 3. С. 315–321.
7. Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. Vacuum Arc — A Cathodic Arc Operating Without Any Process Gas. Springer US. 2013. P. 3945.
8. Kovaleva M. G., Kolpakov A. J., Poplavsky A. I., Galkina M. E. Effect of vacuum annealing on tribological behavior of nanosized diamond-like carbon coatings produced by pulse vacuum-arc method // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34, Iss. 6. P. 481–486.
9. Woodside C. R., King P. E., Nordlund C. Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44, Iss. 1. P. 154–165.
10. Zhi-jun Yang 杨治军, Hong-chao Kou 寇宏超, Xiao-hua Zhao 赵小华, Jin-shan Li 李金山, Rui Hu 胡锐, Hui Chang 常辉, Lian Zhou 周廉. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2011. Vol. 16, Iss. 2. P. 133–136. §
11. Shmelev D. L., Barenholtz S. A., Shchitov N. N. The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma. Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40, Iss. 9. P. 783–786.
12. Belyanchikov L. N. Stabilization of vacuum arc remelting of steels and alloys // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012, Iss. 12. P. 1017–1021.
13. Blinkov I. V., Volkhonskii O. A., Anikin V. N., Konukhov Yu. V. Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2012. Vol. 48, Iss. 6. P. 649–655.
14. Savostikov V. M., Potekaev A. I., Tabachenko A. N. Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition // Russian Physics Journal. 2011. Vol. 54, Iss. 7. P. 756–764.
15. Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Struts V. K. Mechanisms and behavioral regularities of the vacuum-arc microparticles near and on a potential electrode immersed in plasma. Journal of Surface Investigation // X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7, Iss. 6. P. 1148–1155.
16. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., Stolbovoi V. A. Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54, Iss. 3–4. P. 195–203.

Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting

P. A. Livatkin, PAL2010@yandex.ru,

Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, 117997, Russian Federation,

K. A. Polozhentsev, kirill.polozhentsev@gmail.com✉,

Sary Oskol Technological Institute (branch of National Research Technological University "MISIS"),
Sary Oskol, 309516, Russian Federation

Corresponding author: Polozhentsev Kirill A., Postgraduate, Sary Oskol Technological Institute A. A. Ugarov
(branch of National Research Technological University "MISIS"),
Sary Oskol, 309516, Russian Federation, e-mail: kirill.polozhentsev@gmail.com

Received on May 02, 2015

Accepted on June 05, 2015

The paper suggests ways to determine the technological parameters of vacuum arc remelting. Usually, the remelting automated control systems measure only the quantities necessary for a direct control, which in certain cases cannot be used to estimate the reliably the technological parameters of melting. Maintaining of certain technological parameters during melting is a prerequisite for obtaining a quality ingot. These parameters include the melting rate. It cannot be measured directly and it is expected that, with certain values of the electrical power given to the furnace, it will be maintained within the technology described limits, which is not always a fact. The subject of this paper is the method for determination of the rate of melting of a consumable electrode, when, due to the design features of the vacuum arc furnace, it is not possible to measure the weight of the consumable electrode and the ingot. This problem can be solved by installation on the viewing window of the furnace of laser range finders, which in their turn help to determine the amount of the remelted electrode. Knowing the volume of the consumable electrode in the previous and current periods of time one can determine the rate of the going on remelting. Determination of the speed of measurement of the laser range finders is not the least task. The relevance of the data is very important. If measurements are done every four minutes, the system allows us to maintain the rate of melting at the desired level. Since the system of maintaining of the supply of electrical power to the furnace is reasonably stable and rapid heating of the electrode without increasing the power is not feasible, we can expect a stable speed of remelting without any significant deviations from the estimated value.

Keywords: vacuum arc furnace, volume of ingot, volume of electrode, rate of melting, laser rangefinder, electrode approximation, time of measurements, height of ingot, weight of ingot, radius of the electrode

For citation:

Livatkin P. A., Polozhentsev K. A. Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 699–704.

DOI: 10.17587/mau.16.699-704

References

1. **Polozhentsev K. A., Livatkin P. A., Aleksandrov A. G.** *Postroenie modeli protsessa upravleniya napryazheniem vakuumnoi dugovoi pechi. Soobshchenie 1* (Building a model of the process control voltage vacuum arc furnace. Message 1) *Izvestiya Vuzov: Chernaya Metallurgiya*, 2015, no. 3, pp. 203–206 (in Russian).
2. **Lapshin I. V.** *Avtomatizatsiya dugovykh pechei* (Automatisation arc oven), Moscow, Publishing house of NSU, 2004, 165 p. (in Russian).
3. **Mikhailov O. P.** *Avtomatizirovannyye elektroprivodnyye stanki i promyshlennyye roboty* (Automated electric drive machines and industrial robots), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 304 p. (in Russian).
4. **Tashkinov A. Yu.** *Razrabotka matematicheskikh modelei i algoritmov i ikh primeneniye dlya issledovaniya i usovershenstvovaniya protsessov vakuumnogo dugovogo pereplava* (Development of mathematical models and algorithms and their application to the study and improvement of the processes of vacuum arc remelting): Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk, Ekaterinburg, 2003, 21 p. (in Russian).
5. **Nekhamin I. S.** *Razrabotka sistemy upravleniya dugovoi pech'yu postoyannogo toka* (Development of control system of arc furnace DC): Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2009, 20 p. (in Russian).
6. **Fomin A. V.** *Postroenie imitatsionnoi modeli dugovoi staleplavil'noi pechi* (Building a simulation model of the electric arc furnace), *Izv. Tul'skogo Gosud. Universiteta. Tekhn. Nauki*, 2009, no. 3, pp. 315–321. (in Russian).
7. **Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung.** Vacuum Arc — A Cathodic Arc Operating Without Any Process Gas. Springer US. 2013. P. 3945.
8. **Kovaleva M. G., Kolpakov A. J., Poplavsky A. I., Galkina M. E.** Effect of vacuum annealing on tribological behavior of nanosized dia-

mond-like carbon coatings produced by pulse vacuum-arc method, *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, iss. 6, pp. 481–486.

9. **Woodside C. R., King P. E., Nordlund C.** Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, vol. 44, iss. 1, pp. 154–165.

10. **Zhi-jun Yang** 杨治军, **Hong-chao Kou** 寇宏超, **Xiao-hua Zhao** 赵小华, **Jin-shan Li** 李金山, **Rui Hu** 胡锐, **Hui Chang** 常辉, **Lian Zhou** 周廉. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2011, vol. 16, iss. 2, p. 133–136.

11. **Shmelev D. L., Barenogolts S. A., Shchitov N. N.** The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma, *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, iss. 9, pp. 783–786.

12. **Belyanchikov L. N.** Stabilization of vacuum arc remelting of steels and alloys, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, iss. 12, pp. 1017–1021.

13. **Blinkov I. V., Volkonskii O. A., Anikin V. N., Konukhov Yu. V.** Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2012, vol. 48, iss. 6, pp. 649–655.

14. **Savostikov V. M., Potekaev A. I., Tabachenko A. N.** Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition, *Russian Physics Journal*, 2011, vol. 54, iss. 7, pp. 756–764.

15. **Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Struts V. K.** Mechanisms and behavioral regularities of the vacuum-arc microparticles near and on a potential electrode immersed in plasma. *Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, vol. 7, iss. 6, pp. 1148–1155.

16. **Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., Stolbovoi V. A.** Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings, *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, iss. 3–4, pp. 195–203.

УДК 66-5

DOI: 10.17587/mau.16.704-709

Ю. В. Загашвили, д-р техн. наук, проф., ген. директор, y.zagashvili@yandex.ru,
Ю. В. Анискевич, канд. техн. наук, науч. сотр., **А. М. Кузьмин**, канд. техн. наук, науч. сотр.,
А. А. Левихин, канд. техн. наук, науч. сотр., **Г. Б. Савченко**, науч. сотр.,
 ООО "БТП", Санкт-Петербург

Управление технологическим процессом получения синтез-газа в высокотемпературном реакторе

Предложен метод получения синтез-газа заданного состава при реализации перспективной технологии парциального окисления углеводородного горючего. Желаемое соотношение компонентов синтез-газа и требуемая производительность высокотемпературного реактора по синтез-газу обеспечиваются путем связанного регулирования компонентов подачи — массовых расходов углеводородного горючего и окислителя. Метод управления иллюстрируется примером расчета процесса парциального окисления попутного нефтяного газа кислородом.

Ключевые слова: парциальное окисление, углеводородное горючее, окислитель, синтез-газ, высокотемпературный реактор, водород, монооксид углерода, термодинамические расчеты, соотношение компонентов, коэффициент избытка окислителя, химический состав горючего, производительность реактора