

# Алгоритм программного управления переплавом на основе PDM-системы

*П.А. Ливаткин  
мастер УНУПТ ЭВМ, pal2010@yandex.ru  
АО «Металлург. завод «Электросталь», г. Электросталь  
Д. В. Шатов  
к.т.н., с.н.с., dvshatov@gmail.com  
ИПУ РАН, г. Москва*

Переплав слитков в вакуумных дуговых печах сопряжен с рядом проблем управления технологическим процессом. Одной из них является проблема поддержания заданного межэлектродного промежутка. Ранее для этого применялись алгоритмы математической обработки измеряемого напряжения печи, имеющие ряд недостатков. Для решения данной проблемы предложено дополнить существующую систему управления уравнениями программного управления. Они требуют знания точной формы переплавляемого электрода. Эту информацию предлагается получать из PDM-системы. Для этого в PDM-систему предприятия были включены станки с ЧПУ, производящие предварительную механическую обработку электродов.

The vacuum arc remelting process has certain issues with the technological process management. One of them is considered to be maintaining the constant electrode gap. It was initially solved by the algorithms of mathematical processing for measuring the voltage within the arc, and this method had several drawbacks. This article provides a solution to this particular problem by improving the current system through adding the equations of program management. These, however, require the information on the exact shape of a given electrode remelted. This information is proposed to be retrieved from the PDM-system. This was the reason for integrating CNC machines into the factory's PDM-system so that to provide the initial processing of the electrodes.

## Введение

Вакуумная дуговая печь предназначена для переплава металлических электродов в вакууме с заданной скоростью переплава с целью обеспечения равномерной кристаллической решетки и равномерного распределения примесей в получаемом слитке. Металл, который необходимо переплавить, называют электродом. Полученный в результате его переплава называют слитком. Такие качества слитка как его устойчивость к многократным механическим нагрузкам, ковкость, наличие микротрещин напрямую зависят от равномерности его структуры.

Перед началом процесса переплава электрод жестко закрепляют на штоке – механическом зацепе, способном перемещаться вверх или вниз внутри плавильной камеры печи. Затем плавильная камера герметично закрывается, и из нее откачивают воздух. Нижняя половина камеры имеет цилиндрическую форму и выполнена из меди. Она называется кристаллизатором. Во избежание расплавления внешнюю оболочку медного кристаллизатора охлаждают проточной водой.

После начала переплава на дне кристаллизатора начинает образовываться ванна расплавленного металла. Её глубина сравнительно небольшая и уже через 20-30 минут от начала переплава она полностью находится на вершине слитка, практически не касаясь медных стенок. При правильном технологическом процессе дуговые разряды должны проходить между электродом и расплавом, не попадая на кристаллизатор. Это дает ограничение на высоту подъёма электрода над расплавом: она должна быть меньше чем расстояние до слитка. С другой стороны, капли металла при падении не должны вызывать коротких замыканий, поскольку это снижает нагрев электрода, что приводит к существованию нижней границы длины межэлектродного промежутка. В оставшемся допустимом диапазоне длин существует оптимальное расстояние. Его наличие вызвано тем, что около 20% энергии, получаемой электродом, сообщается ему тепловым излучением от расплавленного металла на вершине слитка. На верхней или нижней границе допустимого расстояния эти значения составят соответственно: 13% и 30%, что существенно повлияет на скорость плавки, а, следовательно, и на равномерность застывания металла и его зернистость. Это может привести к появлению микротрещин при его ковке, а возможно и к расколу слитка на части в местах неоднородности структуры.

Схемы вакуумной дуговой печи и её зоны переплава приведены ниже на рисунках 1 и 2.

Существенное влияние на кристаллическую решетку в слитке оказывает [1]:

1. Постоянство скорости переплава электрода.
2. Высота переплавляемого электрода над расплавом, называемая так же межэлектродным промежутком.

Электрод получают отливкой в тигель, материал на стенках которого частично расплавляется. По этой причине перед установкой в ВД печь его обтачивают на станках с ЧПУ. Как видно из схем – форма электрода после этого предполагается цилиндрической. На практике после обработки электрода по программе в цилиндр заданного радиуса рабочий вручную выводит оставшиеся на поверхности дефекты. Это приводит к отклонениям в процессе переплава, которые равнее не были учтены.

В рамках данной работы рассматривается поддержание длины межэлектродного промежутка с применением данных PDM системы.

## 1. Процесс переплава

Для начала процесса переплава электрод (при помощи перемещения штока) опускают к кристаллизатору и прикладывают к ним постоянное напряжение разного знака. Это приводит к образованию электрических дуг между электродом и кристаллизатором.

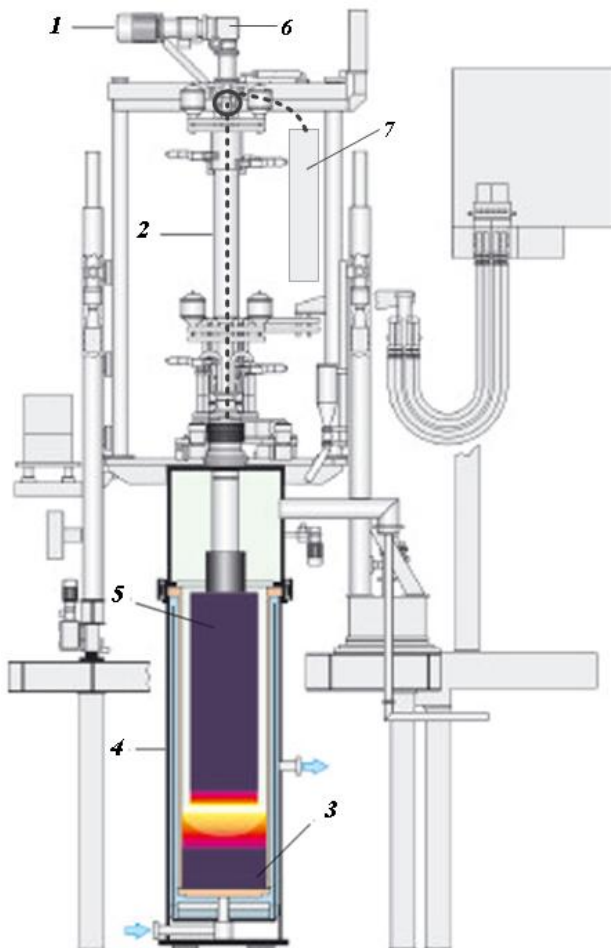


рис 1. Схема вакуумной дуговой печи, где:  
 1-электродвигатель 2-механический шток  
 3-получаемый слиток 4-кристаллизатор  
 5-переплавляемый металл (электрод) 6-редуктор  
 7-противовес

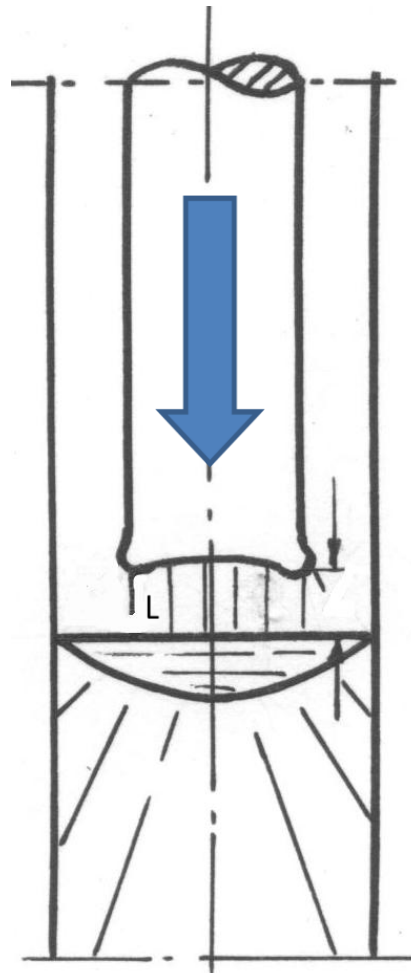


рис. 2 Схема зоны переплава, где: L-длина межэлектродного промежутка

Через несколько минут после начала переплава под электродом образуется расплавленная поверхность слитка и в дальнейшем электрические дуги протекают уже от электрода к слитку.

Поскольку диаметр кристаллизатора больше диаметра электрода – возникает необходимость опускать электрод для поддержания длины межэлектродного промежутка.

## 2. Существующий способ управления

В отечественной металлургии часто применяется управление длиной межэлектродного промежутка по напряжению переплава [1]. В основе этого лежат следующие причины: скорость переплава электрода зависит от тока дуг. Требование постоянства скорости переплава приводит к необходимости поддерживать постоянный ток переплава. Для поддержания тока постоянным источник питания печи изменяет напряжение электрод-слиток.

$$I_n = \frac{U_n(t)}{R_n(t)} = const \quad (1)$$

где  $I_n$  – ток печи, А;  $U_n(t)$  – напряжение печи, необходимое для поддержания  $I_n$ , В;  $R_n(t)$  – сопротивление печи в момент времени  $t$ , Ом

Для электрической цепи, осуществляющей переплав, вакуум в межэлектродном промежутке является активным сопротивлением, поэтому напряжение переплава (порядка 20 В) будет меняться пропорционально сопротивлению печи. Так объясняется взаимосвязь напряжения и длины межэлектродного промежутка. Поэтому существующие САУ часто используют уставку по напряжению  $U_{ж}$ , полученную опытным путем и обеспечивающую желаемую длину промежутка. Она является кусочно-постоянной функцией.

Недостатками такого подхода являются [1]:

1. Измеряемая величина напряжения переплава подвержена существенному высокочастотному внешнему возмущению (до 20% от измеряемой величины,  $\pm 4$  В), вызванному процессом капания металла с электрода в слиток. Капли кратковременно сокращают сопротивление промежутка, что приводит к неточной его оценке.
2. Изменение напряжения переплава для большинства переплавляемых сплавов составляет порядка 0,01 В на 1 мм длины промежутка за каждый кА, что на фоне п. 1 требует огромного усреднения и приводит к существенной инерционности системы регулирования.

Под действием этих факторов при управлении перемещением электрода по напряжению переплава длина межэлектродного промежутка может выйти за рамки допустимых технологией значений. Для поддержания длины межэлектродного промежутка в заданных границах предложено применение программного управления.

### 3. Алгоритм программного управления

Из математической модели ВД печи [2] было получено уравнение, связывающее между собой: скорость переплава (обеспечиваемую током переплава), скорость вращения вала двигателя, механическую систему перемещения электрода, геометрическую форму электрода.

$$\omega_{вал}(t) = \frac{v_{пер}}{K_p \cdot \pi \cdot \rho} \left( \frac{1}{R_{сл}^2} - \frac{1}{r_{эл}^2(t)} \right) \quad (2)$$

где  $t$  – время, с;  $\omega_{вал}(t)$  – необходимая для поддержания длины промежутка скорость вращения вала двигателя, рад/с;  $v_{пер}$  – скорость переплава электрода, кг/с;  $K_p$  – коэффициент передачи вращения вала двигателя через механическую систему для перемещения электрода, м;  $\rho$  – плотность электрода, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{эл}(t)$  – текущий радиус электрода, м;  $R_{сл}$  – радиус слитка, м.

Для управления скоростью вращения двигателя постоянного тока используется выпрямитель, управляемый контроллером. Для статического режима управления (равенство моментов двигателя и нагрузки) электродвигателем получено уравнение, связывающее напряжение на выходе контроллера со скоростью вращения вала двигателя:

$$u_{ф}(t) = (k_m k_e \omega_{вал}(t) - r_{я} M_n(t)) / (k_m k_B) \quad (3)$$

где  $u_{ф}$  – задание на источник питания двигателя с контроллера, В;  $k_m, k_e, r_{я}, M_n$  – физические параметры электрического двигателя, источника питания и его нагрузки.

### 4. Улучшение программного управления с использованием PDM-системы

Как видно из уравнения (2), для подачи сигнала управления с контроллера необходимо знание текущего радиуса электрода. Ранее форма электрода всегда предполагалась цилиндрической [3]. На практике же станок с ЧПУ обтачивает заготовку электрода в цилиндрическую форму, а затем рабочий вручную вытачивает оставшиеся на поверхности дефекты [4]. В результате радиус электрода нельзя считать постоянным. Применение программного управления в таком случае приводит к быстро нарастающей ошибке, и, как следствие, выходу за рамки технологии.

Для реализации программного управления, в котором ошибка нарастала бы намного медленнее, была расширена PDM-система предприятия. Раньше она не включала в себя информацию о конечной форме электрода, получаемой на токарных станках с ЧПУ. В настоящее время на основе цилиндрической формы электрода после обточки по программе и множества точек, проходимых резцом на ручном управлении, ЧПУ станка строит конечный контур обточенного электрода. Затем массиву данных присваивается уникальное имя, состоящее из марки сплава, даты и времени его обточки, а так же диаметра кристаллизатора для которого он предназначен. Полученный массив информации используется для создания цеховой noSQL базы данных. При установке этого электрода в печь перед началом переплава сталевар указывает эти же параметры слитка: марку сплава, время его обточки и диаметр кристаллизатора. После чего автоматически происходит выгрузка контура из базы данных. На рисунке ниже пунктиром приведен цилиндрический контур электрода, а сплошной линией – конечный контур после обточки его вручную для устранения дефектов (включения металлов со стенок тигеля, окислившиеся поверхности, неметаллические включения).

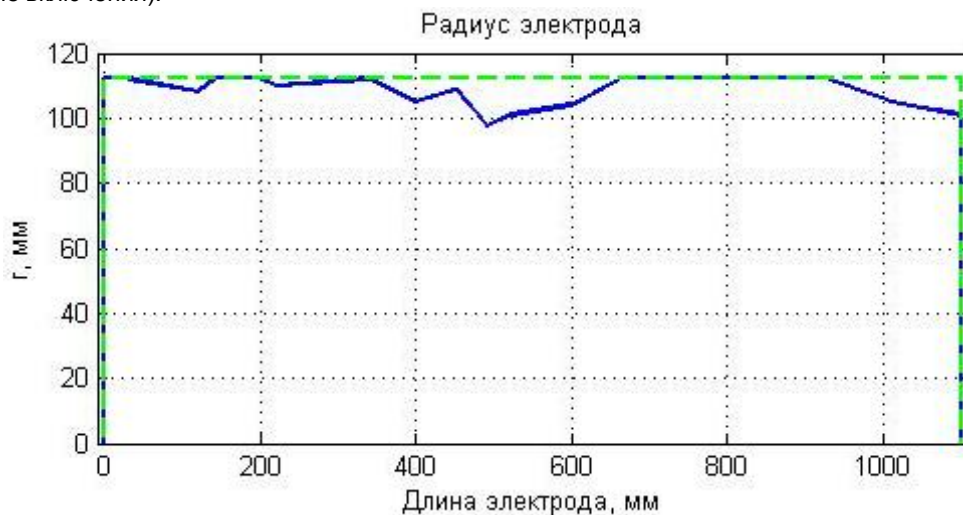


рис. 3 Графическое представление конечного контура электрода из базы данных

Видно, что контур электрода, сохраненный таким образом, легко разбить на множество усеченных конусов. Для нахождения текущего радиуса электрода (между двумя точками) необходимо учесть время, прошедшее с момента начала переплава очередного конуса, скорость плавки и плотность металла (которые зависят от указанной ранее марки сплава). Эти параметры постоянны и необходимы для определения длины сплавленной части конуса. Всё в целом приводит к необходимости решать в реальном времени уравнение третьей степени:

$$\frac{\Delta R^2}{I_{кон}^2} I_x^3 + 3 \frac{R_n \Delta R}{I_{кон}} I_x^2 + 3 R_n^2 I_x - \frac{3}{\pi} v_{пер} t / \rho = 0 \quad (4)$$

где  $\Delta R = R_k - R_n$  – перепад радиусов усеченного конуса, рад/с;  $R_n$  – радиус начала усеченного конуса, мм;  $R_k$  – радиус конца усеченного конуса, мм;  $l_x$  – длина сплавившейся части усеченного конуса, рассчитываемая из этого уравнения, мм;  $l_{\text{кон}}$  – длина усеченного конуса, мм

Зная  $l_x(t)$  появляется возможность вычислить:

$$r_{\text{эл}}(t) = R_n + \Delta R \frac{l_x(t)}{l_{\text{кон}}} \quad (5)$$

Итоговая схема САУ с программным проходом представлена на рис. 4:

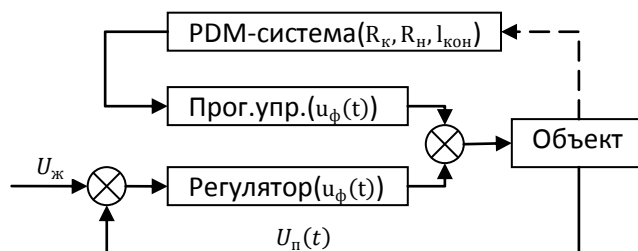


рис. 4 Применение PDM-системы в процессе управления

### Заключение

Расширение PDM-системы на станки с ЧПУ, производящие предварительную механическую обработку, позволило эффективно использовать уравнения программного управления для регулирования процесса переплава. Так же стали доступны полезные для технологов и экономистов данные об объемах стачиваемого металла.

### Литература

1. "Modern Control Strategies for Vacuum Arc Remelting of Segregation Sensitive Alloys" Rodney L. Williamson and M. Eric Schlienger Materials Processing Department Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87 18.5 1134 Christopher L. Hysinger and Joseph J. Beaman Department of Mechanical Engineering University of Texas Austin, Texas
2. 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.
3. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей. – М.: Издательство МГУ, 2004, – 165 с.
4. Нехамин И.С. Разработка системы управления дуговой печью постоянного тока: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2009. – 20 с.