

## МЕТОД ПЛАВКИ АЛЮМИНИЯ В ВАКУУМЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛОГО КАТОДА

*Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, канд. техн. наук,*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,*

*В.А. Омельчук,*

*Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт,*

*авиационной промышленности, г. Харьков, Украина*

### Обзор оборудования для плавки алюминия

Научно-техническая революция обеспечила современное развитие производства в нашей стране. По ряду отраслей промышленности, в частности по выпуску отливок, бывший Советский Союз занимал первое место в мире. После распада Советского Союза большая часть металлургического комплекса досталась Украине. Поэтому создание новых технологий в области металлургии является сегодня приоритетной задачей для независимой молодой страны.

При получении многих деталей машин, приборов и сооружений литые заготовки являются наиболее дешевыми, а в случаях особо сложных деталей или применения неподдающихся обработке давлением сплавов литейная технология является единственно возможной. Вместе с тем, в отливках образуется большое количество специфических дефектов; шероховатость поверхности и точность размеров часто не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к изделиям; свойства сплавов в литом состоянии, как правило, ниже, чем в деформированном. Поэтому проблема дальнейшего повышения качества литых заготовок в настоящее время приобрела решающее значение.

Алюминиевые сплавы широко применяют в авиационной, автомобильной, тракторной промышленности и других отраслях народного хозяйства. Они обладают высокой прочностью, хорошими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, высокими теплопроводностью и электрической проводимостью.

Плавка алюминиевых сплавов может осуществляться в пламенных, электрических печах, в электродуговых печах в вакууме.

Преимуществами пламенных печей являются:

- получение удовлетворительного качества металла, соответствующего действующим стандартам;
- возможность строительства печей большой емкости и высокой производительности;
- относительно низкая стоимость энергоносителей;
- полная механизация загрузки шихты.
- К недостаткам относятся:
- печная атмосфера с водяным паром и другими газами, ухудшающая качество металла;
- безвозвратные потери металла при плавке;
- загрязнение окружающей среды.

Электрические печи имеют следующие преимущества:

- чистота печной атмосферы по сравнению с пламенными печами, содержание водяного пара – 0,25-0,8% (парциальное давление водяного пара 25-80 мм. вод. ст.);
- меньшие безвозвратные потери металла по сравнению с пламенными печами;
- относительно высокий КПД, достигающий 60%;
- обеспечение необходимого температурного режима плавки;
- относительная простота конструкции печи и ее обслуживание.

Данные печи имеют свои недостатки, а именно:

- относительно большой удельный расход электроэнергии, достигающий 50 кВт·ч/т и более;
- практически невозможна полная механизация загрузки шихты;
- невысокая стойкость нагревательных элементов и футеровки.

Во время плавки алюминий насыщается водородом, основным источником которого являются пары воды в

атмосфере газовых печей, влага шихты и гигроскопичных флюсов. Для предохранения алюминиевых расплавов от окисления и насыщения водородом плавку ведут в вакууме, в атмосфере инертных газов или в воздушной среде, содержащей фториды; применяют покровные флюсы или защитное легирование.

Плавка в вакууме позволяет хорошо обезгазить металл – освободить от растворенных в нем азота, водорода, а также кислородсодержащих газов и  $H_2O$ , удалить примеси, упругость пара которых выше, чем основного металла.

Основными процессами, определяющими особенности свойств и качество сплавов, получаемых в вакуумных печах, являются:

- удаление газов и летучих примесей, диссоциация неустойчивых соединений в условиях высокой температуры и вакуума;
- всплывание и удаление неметаллических включений.
- К недостаткам литья в вакууме относятся:
- сравнительно высокая стоимость оборудования;
- металлоемкость и трудоемкость изготовления оборудования;
- пониженная производительность;
- для обслуживания требуется более квалифицированный персонал.

#### Плавка в вакууме с помощью полого катода

Основной идеей применения полого катода для нагрева деталей есть высокий КПД процесса, который при больших токах составляет 90-95% [1] (рис. 1).

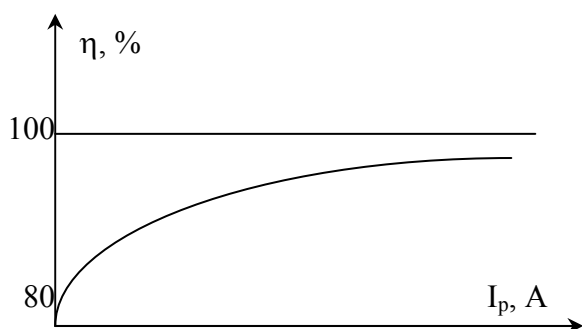


Рис. 1.

Рассмотрим решение простейшей задачи по плавке металла в вакууме с использованием полого катода.

Схема устройства представлена на рис. 2.

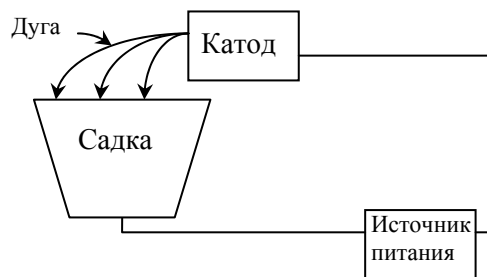


Рис. 2.

При этом примем следующие положения:

- 1) расплавленное тело ограничено одной плоской поверхностью, к которой подводится тепловой поток при работе катода;
- 2) температура тела первоначально во всех точках равна  $T_0$  и повышается равномерно для любого выделенного объема металла;
- 3) температура  $T_{pl}$  представляет собой температуру плавления вещества, являющегося чистым металлом. При плавлении единицы массы тела поглощается теплота кристаллизации  $g$ ;
- 4) тепловые характеристики вещества тела – теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$  и плотность  $\rho$  – постоянны и не зависят от температуры;
- 5) теплопередача в твердой части тела подчиняется уравнению Фурье;
- 6) основные тепловые потери происходят излучением, а теплопроводностью токоподводов пренебрегаем.

Для расчетов нам требуется найти зависимость температуры садки от времени нагрева как функция подводимой мощности или, что то же самое, от тока разряда.

В соответствии с принятыми допущениями можно записать уравнение теплового баланса для садки (1)

$$C \cdot m_c \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{\Sigma+} - Q_{\Sigma-}, \quad (1)$$

где  $\frac{dT}{dt}$  – изменение температуры садки во времени;

$C$  – удельная теплоемкость;

$m_c$  – масса садки;

$Q_{\Sigma+}$  – количество теплоты, которую передает плазма, а при расплаве тела “поглощается” теплотой кристаллизации;

$Q_{\Sigma-}$  – количество теплоты, которое должно быть поглощено окружающей средой излучением:

$$Q_{\Sigma+} = \eta \cdot I_p \cdot U_p + m_c \cdot r, \quad (2)$$

$$Q_{\Sigma-} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S, \quad (3)$$

где  $\eta$  – КПД процесса;

$I_p$  – ток разряда;

$U_p$  – подаваемое напряжение на катод;

$r$  – теплота кристаллизации;

$\varepsilon$  – степень черноты;

Интегрируя данное равенство от  $T_0$  до  $T_{\max}$ , где  $T_{\max} = T_{li}$  – температура литья, получаем:

$$t(T_{\max}, I) = \frac{C \cdot m_c \cdot \left[ \frac{\ln \left[ \frac{a(I_p) + (T_{\max} - T_0)}{a(I_p) - (T_{\max} - T_0)} \right]}{4 \cdot a(I_p)^3} + \frac{\operatorname{atan} \left[ \frac{T_{\max} - T_0}{a(I_p)} \right]}{2 \cdot a(I_p)^3} \right]}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot S} \quad \text{при } T_{\max} < T_{pl}$$

$$+ \frac{C \cdot m_c \cdot \left[ \frac{\ln \left[ \frac{a(I_p) + (T_{\max} - T_0)}{a(I_p) - (T_{\max} - T_0)} \right]}{4 \cdot a(I_p)^3} + \frac{\operatorname{atan} \left[ \frac{T_{\max} - T_0}{a(I_p)} \right]}{2 \cdot a(I_p)^3} \right]}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot S} + \frac{m \cdot r}{I_p \cdot U_p \cdot \eta} \quad \text{при } T_{\max} \geq T_{pl}$$

где

$$a(I_p) = \left[ \frac{\eta \cdot I_p \cdot U_p - \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T_0^4}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot S} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

На рис. 3 представлены зависимости  $T$  от времени нагрева для стандартной садки алюминия массой 250 кг.

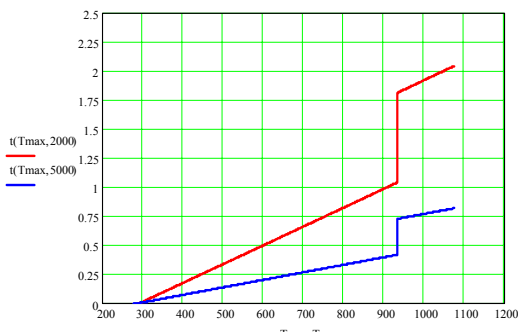


Рис. 3. Кривая с большей “ступенькой” соответствует току разряда 2 кА, с меньшей – 5 кА

$\sigma$  – постоянная Больцмана;

$S$  – для теоретических оценок примем площадь поверхности шара, из которой происходит излучение:

$$S = 4 \cdot \pi \cdot \left[ \frac{3 \cdot m_c}{4 \cdot \pi \cdot \rho} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала садки.

Окончательно получим:

$$d\tau = \frac{C \cdot m_c \cdot \frac{dT}{\eta \cdot I_p \cdot U_p - m_c \cdot r - \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 - T^4}}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot S}.$$

Анализ показывает, что с увеличением силы тока в 2,5 раза время плавки уменьшается почти в 2 раза.

### Энергетический расчет

Для расчета экономической эффективности процесса вакуумной плавки с помощью полого катода рассчитаем энергетические затраты. Запишем затраты энергии потребляемые установкой:

$$N_{уст} = \frac{I_p \cdot U_p}{\eta} + N_{фн} + N_{дн} + N_{вн}, \quad (8)$$

где первый множитель – это мощность системы электропитания установки;

$N_{фн}$  – мощность форвакуумных насосов;

$N_{дн}$  – мощность высоковакуумного насоса;

$N_{вн}$  – мощность водяного насоса.

Тогда удельная мощность всей установки

$$N_{уд} = \frac{N_{уст} \cdot \tau}{m_c}. \quad (9)$$

На рис. 4 представлена зависимость удельной мощности, необходимой для разогрева садки алюминия массой 250 кг, от тока разряда.

Из графика можно сделать вывод о том, что для тока разряда 2 кА удельная мощность плавки алюминия составляет порядка 0,31 кВт\*ч/кг. С увеличением силы тока удельные энергозатраты падают до 0,297 кВт\*ч/кг, что на сегодняшний день является энергетическим минимумом, который можно получить на данный момент времени с применением разработанных полых катодов.

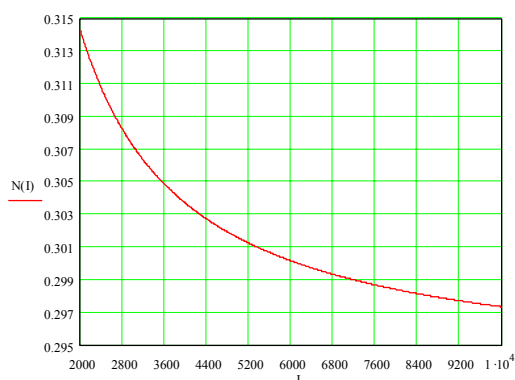


Рис. 4.

### Выводы

Выбор оборудования литья определяется требованиями, предъявляемыми к качеству отливки, отсюда определяется метод литья, а также стремлением получить отливку с наименьшими затратами труда и энергии на ее изготовление и последующую обработку при наименьшем расходе металла. В таблице показаны удельные расходы электроэнергии печей различных конструкций для плавки алюминия.

Таблица

N п/п	Наименование оборудования	Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/кг
1.	Индукционная тигельная печь типа ИАТ-6	0,557
2.	Индукционная канальная печь типа ИАК	0,500
3.	Тигельная печь сопротивления типа САТ	0,550
4.	Электрические тигельные печи фирмы "Nabertherm", Германия	0,450
5.	Установка с полым катодом	0,310

Сравнивая полученный результат, видим, что экономия электроэнергии составляет от 30 до 45%.

Сравнительная оценка энергетических параметров оборудования для плавки алюминия, применяемого на данный момент на большинстве заводов бывшего Советского Союза, и метода плавки алюминия в вакууме с помощью полого катода свидетельствует об экономической целесообразности использования полого катода для плавки алюминия: экономия электроэнергии - до 45%.

### Литература

1. Оранский А.И., Будяк Б.П. Исследование свойств полого катода // Источники и ускорители плазмы: Сб. науч. тр.- Харьков: ХАИ, 1985.- С. 145.
2. Побежимов П.П. Металлургия коррозионно-стойких алюминиевых сплавов и отливок.- М.: Металлургия, 1989.- 251 с.
3. Шевцов М.С., Белов А.Ф. Сравнение технологических характеристик различных типов печей и миксеров для плавки алюминиевых сплавов.- М.: ВНИИЭМ, 1966.- 50 с. (Отделение научно-технической информации, стандартизации и нормализации в электротехнике).
4. Курдюмов А.В., Пикун М.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов.- М.: Металлургия, 1986.- 284 с.
5. Могилев В.К., Лев О.И. Справочник литейщика.- М.: Машиностроение, 1988.- 271 с.
6. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов.- Л.: Машиностроение, 1976.- 214 с.

Поступила в редакцию 08.06.03

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; д-р техн. наук, профессор Ю.С. Васильев, УХИН, г. Харьков.