

**Семенов К.И.**

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,  
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина,  
[semenovki@rambler.ru](mailto:semenovki@rambler.ru)*

### **Диспергирование металла в дуге пульсирующего тока**

*Рассмотрены физические закономерности осуществления диспергирования прутка металла в дуге пульсирующего тока. Предоставлены рекомендации относительно его реализации и оптимизации процесса диспергирования. Получены экспериментальные зависимости, необходимые для расчета параметров диспергирования меди.*

Вопросы физики диспергирования, связанные с получением сферических гранул металлов имеют большое значение для порошковой металлургии, приборостроения (подшипники), некоторых специальных приложений (например, ложные цели при маскировке летательных аппаратов), а также в научных исследованиях физики теплообмена и др.

От известных способов диспергирования металлов [1], способ диспергирования в импульсной электрической дуге отличается тем, что позволяет с высокой энергоэффективностью, экологически чисто (безотходно) получать монодисперсные сферические гранулы металлов заданного размера [2]. При использовании этого способа производительность ограничивается тем, что передвижение прутка металла осуществляется в промежуток времени, когда дуга гаснет, плавления прутка не происходит. В [3] был предложен способ генерации с постоянной подачей прутка, без гашения дуги, что увеличило производительность. В статье более детально, нежели это сделано в патенте [4], рассмотрены физические закономерности осуществления диспергирования предложенным способом, а также даны рекомендации по его реализации.

Способ генерации монодисперсных сферических гранул металлов заключается в том [3], что (рис. 1) между неплавящимся электродом и плавящимся прутком металла при помощи высоковольтной искры поджигается дуга, которая оплавляет металлический пруток. На плавящемся прутке образуется капля жидкого металла, которая под действием развивающихся сил электронного давления и пинч-эффекта отделяется от прутка, принимая, за счет сил поверхностного натяжения, сферическую форму. Известно, что катодное пятно дуги имеет меньшую площадь, чем анодное [2], поэтому в процессе плавления прутка часть энергии дуги  $Q_1$  передаётся в еще не оплавленную часть прутка, а часть энергии  $Q_2$  в образующуюся каплю расплавленного металла, вызывая повышение её температуры вплоть до температуры кипения. Соотношение между этими энергиями в процессе плавления прутка изменяется, а именно: в начале плавления, после того, как от прутка отделилась капля, вся энергия идет на нагрев конца прутка, а перед отделением капли практически вся энергия дуги

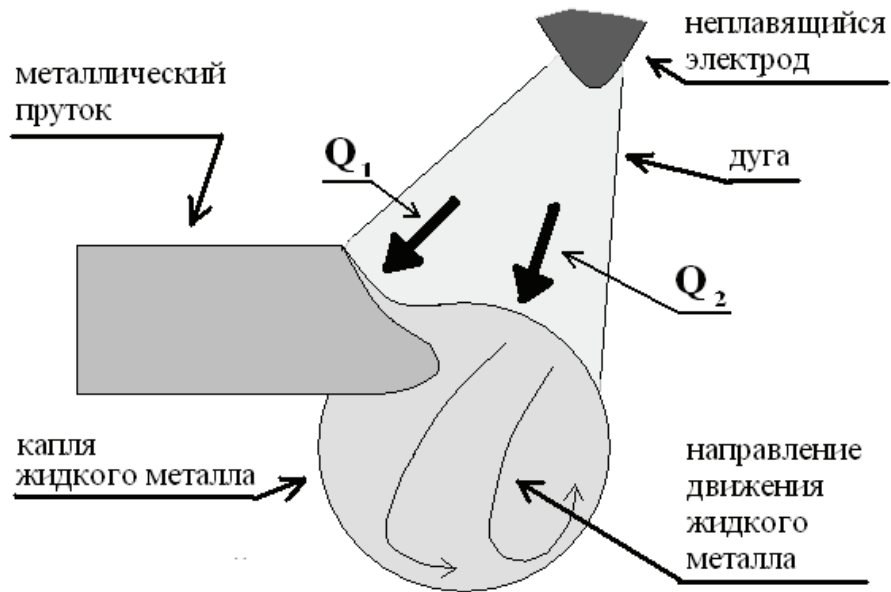


Рис. 1. Плавление прутка под действием несоосной прутку электрической дуги

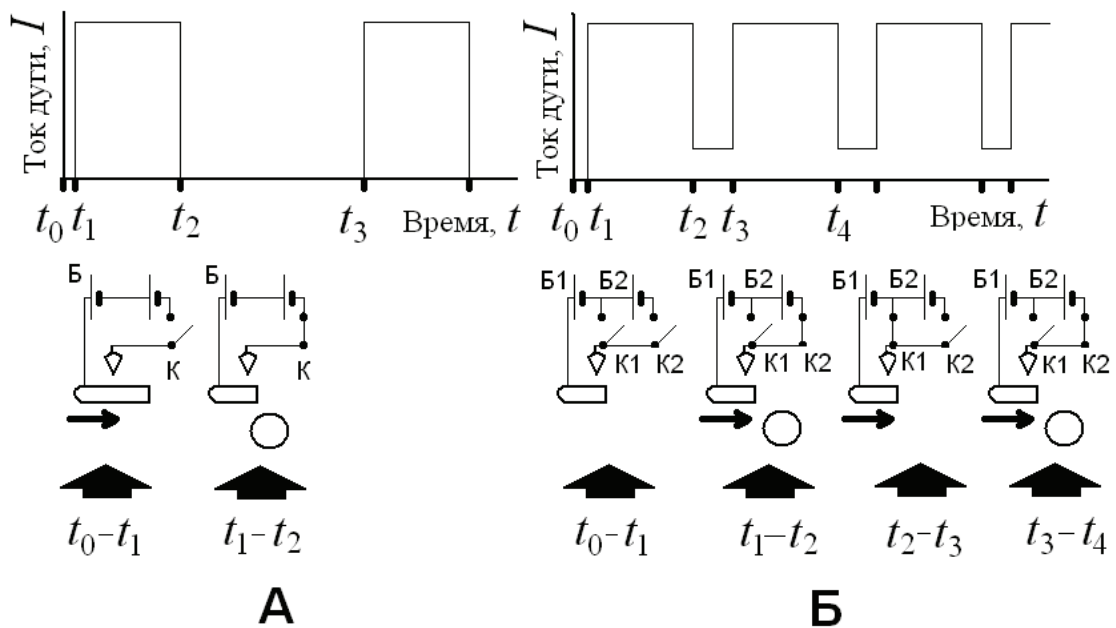


Рис. 2. Зависимость силы тока от времени при получении металлической гранулы в импульсной дуге. а) генерация в импульсной дуге; б) генерация в дуге пульсирующего тока.

идет на нагрев капли. Поскольку условия теплопереноса осложняются особенностями ввода энергии дуги, а также условиями прогрева (перемешивания жидкого металла) в образующейся капле металла, изменением температуры капли по мере её роста, то составить адекватное уравнение теплопереноса для плавящегося электрода не представляется возможным. Если же иметь экспериментальные данные о взаимозависимости тока дуги, температуры и диаметра образующихся частиц, то для процесса оплавления прутка

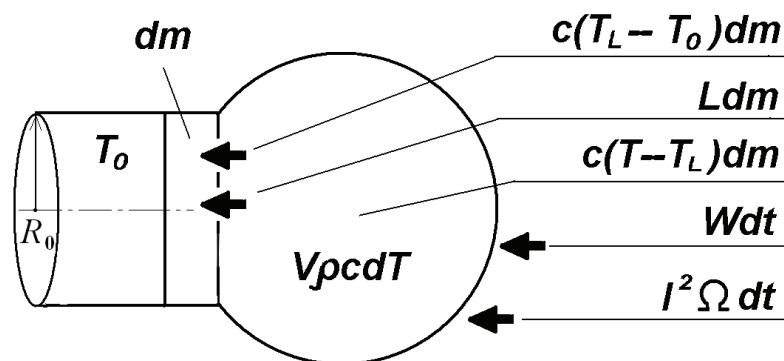


Рис. 3. Элементарные потоки тепла, учитываемые при составлении уравнения теплового баланса.

можно составить уравнение, выражающее закон сохранения энергии, включающее неизвестные параметры генерации, и позволяющее их рассчитать. Для диспергирования в импульсной дуге (рис. 2а) такое уравнение представлено в [2]. Для диспергирования в дуге пульсирующего тока уравнение будет выглядеть аналогично.

Следует только учесть, что при диспергировании в импульсной дуге плавление прутка начинается в точке, отстоящей от конца прутка на расстояние равное двум радиусам прутка. На рис. 2а это соответствует моменту времени  $t_1$ , а при диспергировании в дуге пульсирующего тока, (рис. 2б) дуга начинает оплачивать конец электрода. За время  $dt$  в каждую фазу генерации капли в плавящуюся часть прутка от электронов дуги, поступает энергия  $UIdt = Wdt$ , где  $I$  – ток дуги,  $U$  – падение напряжения на дуге,  $W$  – мощность, подводимая в электрод от дуги [5] (рис. 3). Количество теплоты, сообщённое части плавящегося электрода за время  $dt$  расходуется: на плавления массы электрода  $dm$ , с удельными теплоёмкостью  $c$  и теплотой плавления  $L$ ; на повышение температуры  $dm$  от начальной  $T_0$  до температуры плавления  $T_L$ , на нагрев оплавленной части электрода от температуры плавления до текущей температуры  $T$ ; на нагрев уже расплавленной ранее части электрода объёмом  $V_s$  и плотностью  $\rho$ . Сообщённое тепло складывается из: энергии, выделяющейся при торможении электронов дуги в жидкой фазе  $dQ_e$ ; тепла  $dQ_i$ , выделяющегося при прохождении электрического тока через сопротивление  $\Omega$ , образованного жидкой фазой, равного  $\Omega I^2 dt$ . Джоулевым теплом в  $dm$  можно пренебречь вследствие его малости. Как показал расчет, излучением, конвективным теплообменом и теплопроводностью с площади оплавленной части электрода также можно пренебречь, т.к. их вклад в общий тепловой баланс составляет порядка 1%. Как уже было сказано, для решения уравнения необходимо дополнительно знать либо  $(dT/dt)(t)$ , либо временную зависимость радиуса капли расплавленного металла  $R(t)$  или взаимосвязь. Эти зависимости можно определить экспериментально. Например, определение изменения температуры оплавленной части прутка осуществлялось на экспериментальном стенде, представленном на рис. 4. Для медного прутка они приведены на рисунках 5, 6, 7. Очевидно, что для выхода на заданные зна-

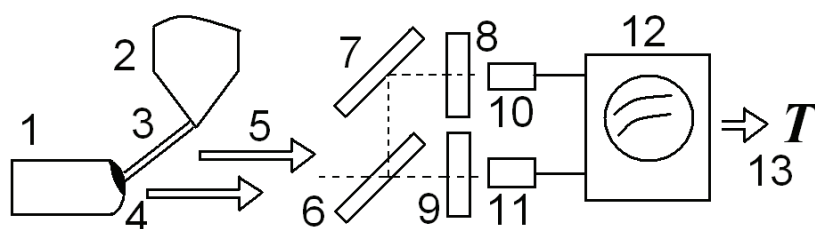
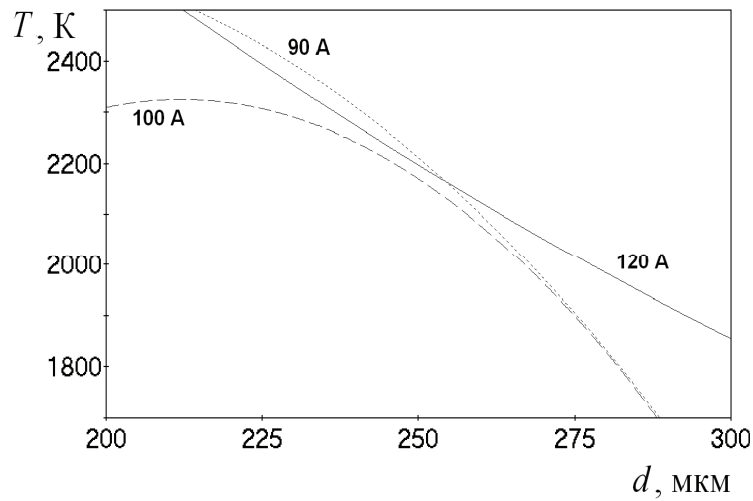


Рис. 4. Схема экспериментального стенда для измерения температуры оплавленной части прутка. 1 – металлический пруток, 2 – отрицательный электрод, 3 – дуга, 4 – расплавленная часть прутка (закрашена), 5 – стрелками обозначено излучение расплавленной части прутка и дуги, 6 – полупрозрачное зеркало, 7 – зеркало, 8 и 9 – узкополосные светофильтры, отсекающие свечение дуги, 10 и 11 – фотодатчики, 12 – запоминающий осциллограф, 13 – расчет температуры по светимости в двух участках спектра.

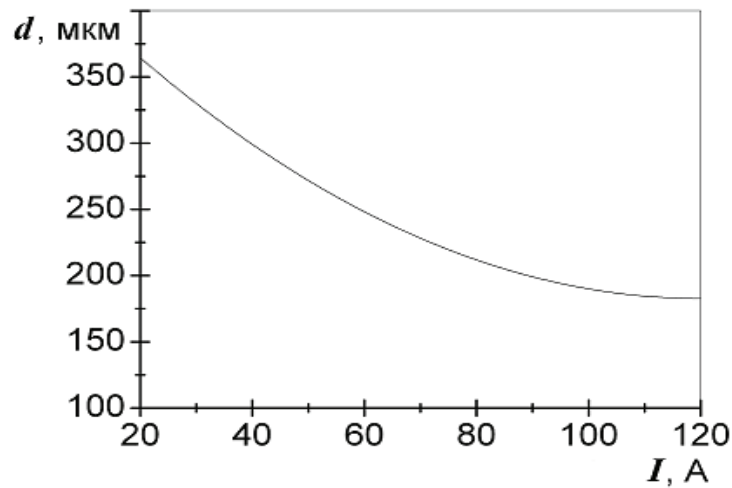
чения начальной температуры и размера частицы, необходимо изменять как скорость подачи прутка в зону действия дуги, так и ток дуги. Величина силы тока должна быть достаточной для оплавления части прутка и для необходимой величины сил пинч-эффекта и электронного давления. Минимальную силу тока необходимо ограничить условием поддержания горения дуги, около 1 А. При этом можно выбирать угол между прутком и дугой в пределах  $0^{\circ} - 90^{\circ}$ , а расстояние между электродами - от 100 мкм до 1 мм. На рис. 2б схематично показана связь изменения тока с фазой диспергирования. В момент времени  $t_0$  прутки неподвижны, в момент времени  $t_1$  прутки начинают движение. В этот же момент времени электронный ключ К2 подключает к предварительно «пробитому» высоким напряжением межэлектродному промежутку источники тока Б1 и Б2, что обеспечивает прохождение тока, достаточного для оплавления прутка. Источник высокого напряжения подключается только один раз, в начале процесса диспергирования (на рисунке не показано). В момент времени  $t_2$  ключ К2 размыкается и одновременно замыкается К1, подключая к промежутку меньшее напряжение Б1, (замыкание и размыкание должно происходить с некоторым разрывом по времени, чтобы избежать сквозные токи). Падение тока при гашении дуги может длиться до 1 мкс [6].

Падение тока вызывает развитие пинч- и скин- эффектов, что приводит к отделению капли жидкого металла от прутка. Далее, в момент времени  $t_3$  ключ К1 размыкается, а ключ К2 замыкается, что вызывает прохождение тока большей величины, оплавление прутка и, таким образом, появление следующей капли жидкого металла. Далее процесс повторяется.

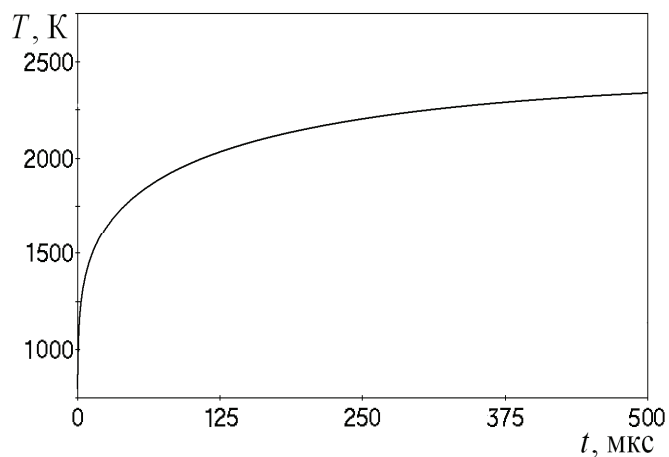
По описанной выше методике проведено диспергирование медной проволоки радиусом  $R_3 = 80$  мкм. Проволока подавалась со скоростью около 0.5 м/с в зону образования дуги так, что дуга и проволока образовывали угол  $90^{\circ}$ . При прохождении проволоки под неплавящимся электродом подачей импульса высокого напряжения инициировалось возникновение непрерывного дугового разряда, который поддерживался током 40 А в максимуме и 5 А в минимуме. Время понижения тока составляло 10 мкс. Охлаждение оторвавшихся от прутка капель проводилось в ванне с силиконовым маслом. При этом получены сферические гранулы меди диаметром  $d = 250$  мкм  $\pm$  23 мкм при частоте изменения ве-



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость температуры  $T$  капля металла перед отделением от медного прутка радиусом  $R_0 = 80$  мкм от их диаметра  $d$  при различных значениях тока дуги  $I$ .



**Рис. 6.** Экспериментальная зависимость диаметра образующихся частиц от силы тока дуги для медного плавящегося электрода  $R_s = 80$  мкм.



**Рис. 7.** зависимость температуры капли на конце оплаваемого прутка, диаметром 80 мкм, при токе плавления 120 А.

личины тока  $\lambda = 2$  КГц и  $d = 346 \text{ мкм} \pm 32 \text{ мкм}$  при  $\lambda = 1.44$  КГц.

Таким образом, несмотря на то, что процесс диспергирования металлического прутка в дуге пульсирующего тока нельзя описать строго аналитически, на основе экспериментальных данных возможно определить величины, необходимые для расчёта, скорости подачи прутка металла в зону действия дуги в зависимости от тепло- электрофизических параметров диспергируемого металла ( $c, \rho, \Omega, L, T_L$ ) и заданных размеров и температуры капель металла.

### Литература:

1. Монодиспергирование вещества: принципы и применения / *Е.В.Аметистов, В.В.Блаженков, А.К.Городов и др.*; под ред. *В.А. Григорьева*. – М.: Энергоиздат, 1991. – 336 с.
2. *Семенов К.И.* Роль скин- и пинч-эффектов при генерации частиц металлов в импульсной дуге // *Физика аэродисперсных систем*. – 2004. – №. 41. – С. 334-348.
3. Теория сварочных процессов // Под ред. *В.В. Фролова*. – М.: Высш. Шк., 1988. – 559 с.
4. *Семенов К.И.* Спосіб виготовлення гранул з прутка металу або сплаву // 51576 от 26.07.2010. Патент опубліковано 26.07.2010, бюл. № 14/2010.
5. *Семенов К.И.* Роль скин- и пинч-эффектов при генерации частиц металлов в импульсной дуге // *Физика аэродисперсных систем*. – 2004. – № 41. – С. 334-348.
6. *Багрянский К.В., Добротина Э.А., Хренов К.К.* Теория сварочных процессов. – К., Издательское объединение «Вища школа», 1976. – 424 с.

### *Семенов К.И.*

#### **Диспергування металу в дузі пульсуючого струму.**

##### АНОТАЦІЯ

*Розглянуто фізичні закономірності здійснення диспергування металевого прутка у дузі пульсуючого струму. Надано рекомендації щодо його реалізації і оптимізації процесу диспергування. Отримано експериментальні залежності, необхідні для розрахунку параметрів диспергування міді.*

### *Semenov K.I.*

#### **Dispersion of metal in the arch of the pulsing current.**

##### SUMMARY

*Physical conformities to law of realization of dispergating of small metallic twig in the arc of pulsating current are considered . Recommendations are given in relation to its realization and optimization of dispergating process. Experimental dependences, necessary for the calculation of parameters of dispergating of copper, are got.*