

ОХЛАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ В КОНУСЕ РАСПЫЛА ПРИ
ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЫЛЕНИЕМ

А. Ф. КРУПИН, Г. П. БОЙКОВ

(Представлено проф. докт. техн. наук А. Н. Добровидовым

и проф. докт. техн. наук Г. И. Фукс)

Исследование температуры частиц в конусе распыла при металлизации распылением имеет большое практическое значение и представляет теоретический интерес.

Первоначальные сведения о температуре частиц в момент удара их о металлируемую поверхность носили чисто качественный характер. Лишь позднее температура частиц в конусе распыла была определена экспериментально калориметрическим методом [1, 2], с помощью оптического пирометра [3 и др.], термопарой [4] и по форме частиц после удара их о полированную стальную пластину [5]. Трудность решения задачи связана с тем, что размеры частиц металла, по данным различных исследователей, находятся в пределах от 0,001 до 0,015 мм [2, 6], и время полета их от очага плавления до поверхности металлируемого изделия колеблется в пределах от 0,002 [6] до 0,003 сек [7].

Экспериментальные методы исследования температуры частиц в конусе распыла позволяют определить лишь среднюю температуру металлических частиц, без указания их размера. Полученные при этом различными авторами результаты измерений разноречивы, о чем свидетельствуют данные табл. 1, и поэтому мнения исследователей о механизме слоеобразования и о природе сил сцепления частиц в металлизационных слоях также расходятся.

Таблица 1

Автор и источник	Метод измерения температуры	Материал	Способ металлизации	Температура частиц при ударе
Н. В. Катц [2]	Калориметрический	Сталь	Электрический	0,55—0,80 $t_{кр}^1$
А. Ф. Троицкий [1]	Расчетно-калориметрический	Сталь	Электрический	0,85—0,95 $t_{пл}^1$
Г. А. Иоанниди [3]	Оптический	Сталь	Электрический	820—1167°C
Л. В. Красниченко [5]	По форме частиц	Сталь	Электрический	$t_{пл}$
Т. Терстон [4]	Термопарой	Различные материалы	Газовый	$t_{пл}$

Нами сделана попытка решить этот вопрос теоретически для любых размеров частиц металла, имеющих место при электрометаллизации. При этом за исходные данные приняты имеющиеся в литературе величины размеров частиц, времени полета частиц, а также значения теплофизических характеристик материалов.

¹⁾ $t_{кр}$ — температура кристаллизации, $t_{пл}$ — температура плавления металла.

Физическая картина процесса

Под воздействием тепла вольтовой дуги в металлизационном пистолете происходит плавление стальных электродов, металл которых служит материалом для требуемого покрытия. В момент плавления жидкая масса металла распыливается свободной струей воздуха на мельчайшие частички, которые под действием сил поверхностного натяжения стремятся принять форму шара. Жидкая частица, вылетая из очага плавления металлизационного пистолета, начинает резко охлаждаться в основном за счет лучеиспускания.

Постановка задачи

Стальной шар диаметром $2R=5$ микрон при температуре $t_0 \cong 1550^\circ\text{C}$ в начальный момент времени помещается в воздушное пространство и охлаждается в течение времени полета $\tau_{пол}=0,002-0,003$ сек.

Для расчета охлаждения стального шара принимаем следующие данные [8]:

коэффициент теплопроводности $\lambda=25$ ккал/м час град,
коэффициент температуропроводности $a=0,025$ м²/час,
коэффициент излучения материала $C=4,2$ ккал/м²час °K⁴.

Влиянием конвекции на процесс охлаждения шара пренебрегаем.

Основные обозначения

$\Theta_m = \frac{T_m}{T_c}$ — критерий безразмерной переменной температуры;

$\Theta_0 = \frac{T_0}{T_c}$ — критерий безразмерной начальной температуры;

$K_i = \frac{q_c \cdot R}{\lambda \cdot T_c}$ — критерий Кирпичева;

$F_{01} = \frac{a \cdot \tau_1}{R^2}$ — критерий Фурье;

$Q_{ci} = \frac{q_{ci}}{q_c}$ — критерий безразмерного лучистого потока на поверхности тела

R — радиус металлической частицы, м;

τ — время от начала охлаждения, сек;

τ_1 — расчетный интервал времени, час;

T — абсолютная температура тела, °K;

t — температура тела по стоградусной шкале, °C;

m — число, показывающее сколько интервалов времени τ_1 прошло от начала охлаждения;

μ_n — характеристические числа, полученные из уравнения $\text{tg} \mu = \mu$ [9].

Для того, чтобы произвести требуемый расчет, воспользуемся выражением для прогрева „тонкого“ шара [10, стр. 89], которое можно представить в критериальной форме

$$\Theta_m = \Theta_0 + 3 \cdot K_i \cdot F_{01} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} Q_{ci}. \quad (1)$$

Так как критерии Кирпичева, Фурье и безразмерного лучистого потока являются характеристиками как нагрева, так и охлаждения, то, изменяя

знак перед произведением этих критериев на обратный, сведем задачу на нагревание к задаче на охлаждение. Тогда выражение (1) переписывается так:

$$\Theta_m = \Theta_o - 3 \cdot K_i \cdot F_{01} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} Q_{ci}. \quad (2)$$

Производя замену критериев подобия через соответствующие им симплексы и комплексы, для расчета охлаждения шара получим окончательную формулу:

$$t_m = t_o - 3 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{\lambda \cdot R} \cdot \sum_{i=1}^{i=m} q_{ci}, \quad (3)$$

где

$$q_{ci} = C \cdot \left(\frac{T_{i-1}}{100} \right)^4 - \quad (4)$$

лучистый поток от поверхности шара; τ_1 — расчетный интервал времени, определяемый с помощью формул [10, стр. 63 и 100]

$$\tau_1 = \frac{0,0155 \cdot T_o \cdot \lambda \cdot R}{q_{ci} \cdot a} \quad (5)$$

$$\text{и } \varphi_m < \frac{5 \cdot (q_{c1} - q_{c2})}{q_{c1} \cdot \left(3 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{R^2}} \right)}, \quad (6)$$

здесь φ_m — действительная погрешность расчета.

Используя соотношения (3—6), производим следующие операции:

1. Определение расчетного интервала времени.

Согласно формуле (5) $\tau_1 = 15,2 \cdot 10^{-8}$ час.

2. Определение температуры шара по истечении первого расчетного интервала времени τ_1 .

Согласно формуле (3)

$$t_1 = t_o - 3 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{\lambda \cdot R} \cdot q_{c1} = 1465^\circ \text{C}.$$

Тогда лучистый поток, действующий на протяжении второго расчетного интервала времени $\tau_1 = 15,2 \cdot 10^{-8}$ час будет

$$q_{c2} = C \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 = 384 \cdot 10^3 \frac{\text{к.кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}.$$

3. Оценка приближения расчета.

Подставляя в неравенство (6) соответствующие числовые значения, получим $\varphi_m < 0,29$. Таким образом погрешность вычислений при выбранном расчетном интервале времени $\tau_1 = 15,2 \cdot 10^{-8}$ час составит менее 29%.

Желая вести расчет с большей степенью точности, задаемся меньшим значением расчетного интервала времени $\tau_1 = 3,47 \cdot 10^{-8}$ час. Тогда

$$t_1 = t_o - 3 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{\lambda \cdot R} \cdot q_{c1} = 1530^\circ \text{C};$$

$$q_{c2} = C \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 = 446 \cdot 10^3 \frac{\text{к.кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}.$$

Подставив вместо соответствующих выражений правой части неравенства (6) их значения получим $\varphi_m < 0,043$, т. е. погрешность расчета при выбранном расчетном интервале времени составляет менее 4,3%. Считая

такую погрешность допустимой, для дальнейших вычислений окончательно принимаем $\tau_1 = 3,47 \cdot 10^{-8}$ час.

4. Определение температуры шара по истечении второго такого же отрезка времени от начала прогрева.

Согласно формуле (3)

$$t_2 = t_0 - 3 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{\lambda \cdot R} \cdot (q_{c1} + q_{c2}) = 1512^\circ\text{C}.$$

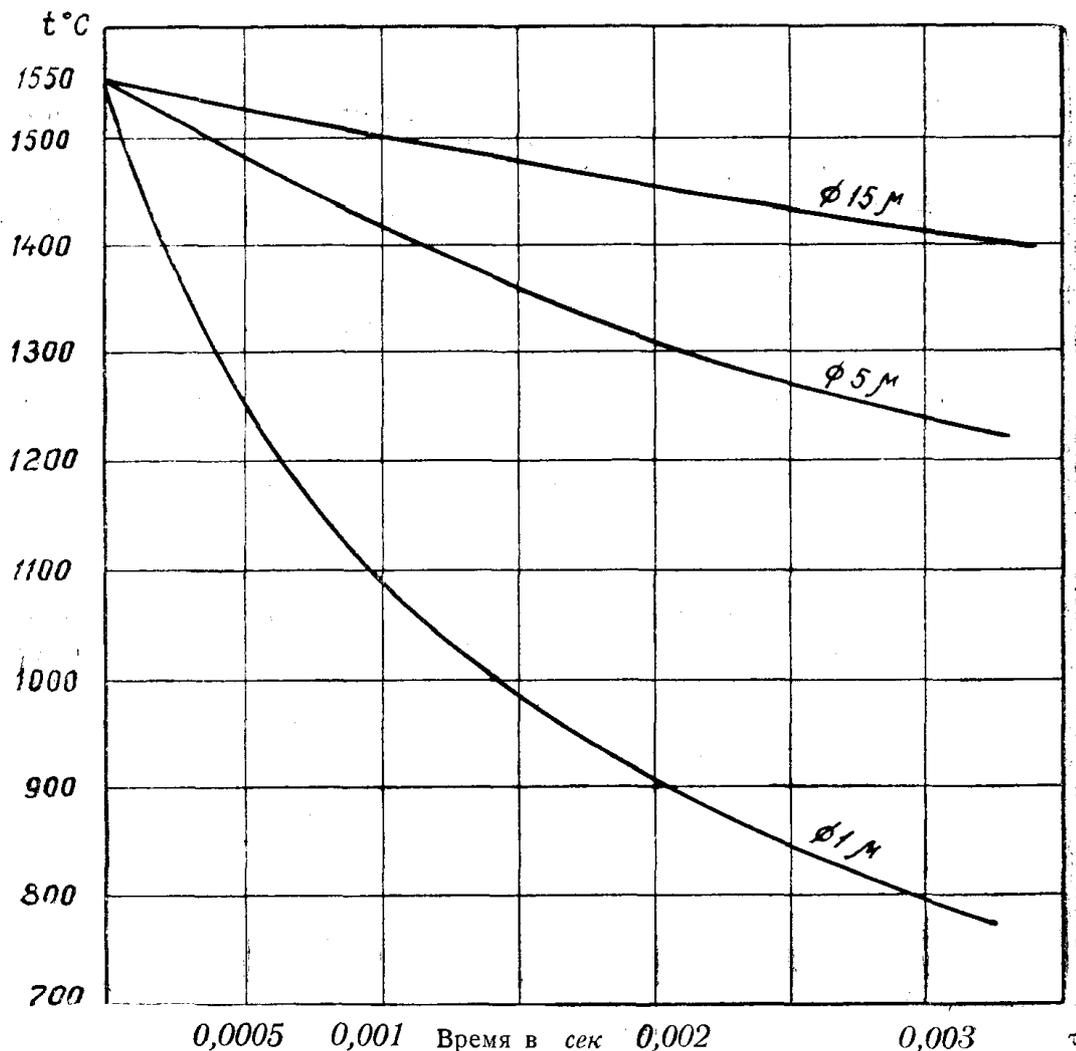
Тогда лучистый поток, действующий на протяжении третьего отрезка времени будет

$$q_{c3} = C \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 = 425 \cdot 10^3 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}.$$

Зная значение q_{c3} , определяем температуру в конце третьего такого же отрезка времени τ_1

$$t_3 = t_0 - 3 \cdot \frac{a \cdot \tau_1}{\lambda \cdot R} \cdot (q_{c1} + q_{c2} + q_{c3}) = 1494^\circ\text{C}.$$

Аналогично находим t_4, t_5, t_6 и т. д. Результаты расчета наносим на график $t = f(\tau)$ (фиг. 1). Здесь же приведены результаты подобных расчетов для частиц диаметров в 1 и 15 микрон.



Фиг. 1. Изменение температуры частиц в зависимости от времени

Для того, чтобы определить температуру исследуемой частицы в конце полета, на оси абсцисс находим значения $\tau = 0,002 \text{ сек}$ и $\tau = 0,003 \text{ сек}$ и из этих точек восстанавливаем перпендикуляры до пересечения с соответствующими кривыми $t = f(\tau)$.

Проведенный расчет температуры частиц в конусе распыла позволяет сделать следующее заключение.

Температура частиц в момент удара их о металлизуемую поверхность хорошо согласуется с экспериментальными данными различных авторов (табл. 1 и фиг. 1).

Проведенные теоретические исследования дают возможность отчасти объяснить те расхождения в экспериментальных данных, которые имеют место в различных работах. Из анализа кривых становится очевидным, что на результаты экспериментальных данных оказывают большое влияние как размеры частиц, так и время их полета, которые, в свою очередь, зависят от режимов металлизации.

Проведенный расчет не является окончательным, так как при исследовании не была учтена скрытая теплота кристаллизации металла, которая до некоторой степени замедляет скорость охлаждения частиц.

Предлагаемый метод исследования может быть рекомендован для практических целей в качестве первого приближения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий А. Ф. Теоретические основы покрытия металлических изделий сталью. Диссертация, Москва, 1952.
2. Катц Н. В., Линник Е. М. Электрометаллизация. Сельхозгиз, 1953.
3. Электрометаллизация при ремонте изношенных автодеталей (краткое руководство). Воениздат Народного Комиссариата обороны, 1945.
4. James E. Cline, R. T. Thurston and J. Wulff, Determination of the Temperature of Sprayed Metal Particles, Welding Journal, 1950, Vol 25, № 7.
5. Красниченко Л. В. и Щиржецкий М. Н. К вопросу образования металлизационных слоев. Журнал технической физики, том XXV, вып. 5, 1955.
6. Гарфункель С. Л. и Бердников М. П. Теория и практика металлизации распылением. Гизлегпром, 1940.
7. Каган Ф. Л. Руководство к лабораторным работам по восстановлению боевых машин. Издание Академии бронетанковых и механизированных войск Красной Армии, 1946.
8. Немчинский А. Л. Тепловые расчеты термической обработки. Судпромгиз, 1953.
9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва, 1952.
10. Бойков Г. П. Прогрев тел под действием лучистого тепла (диссертация). Томский политехнический институт, 1955.