

УДК 621.762

ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Н. Х. Копыт, К. И. Семенов, Н. Н. Копыт

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

Дані теплофізичні розрахунки процесу диспергування металевих прутків металів. Виведено співвідношення газодинамічних і гравітаційних сил, що діють при диспергуванні, необхідних для його реалізації. Наведено дані по електричному заряду одержуваних гранул. Надано рекомендації щодо застосування сукупності отриманих результатів у 3D друку металевих деталей і конструкцій

Даны теплофизические расчёты процесса диспергирования металлических прутков металлов. Выведены соотношения газодинамических и гравитационных сил, действующих при диспергировании, необходимых для его реализации. Приведены данные по электрическому заряду получаемых гранул. Даны рекомендации по применению совокупности полученных результатов в 3D печати металлических деталей и конструкций

Thermophysical calculations of the process of metal rods dispersion are presented in this paper. The required conditions for the performance of the dispersion process are established and the ratios of gas-dynamic and gravitational forces acting in the investigated systems are obtained. The data of the electric charge of the obtained granules are provided. Recommendations to the application of the presented results in 3D printing of metal parts and structures are given

Вступление

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

Широко и успешно реализуемое [1,2] диспергирование различных жидких веществ, базирующееся на явлении рэлеевской неустойчивости струи жидкости по отношению к механическим возмущениям, не вполне приемлемо при диспергировании металлов умеренной (с температурой плавления $T_{пл}$ около 1000 °С) и повышенной (свыше 2000 °С) тугоплавкости из-за ряда технических трудностей (расплавление большой массы металла; формирование жидкой струи металла с определёнными параметрами и т. д.). Одной из технологий получения гранул металлов в порошковой металлургии является газодинамическое диспергирование металлов в струе газа [3], в частности, в струе горячего газа (газоплазменного генератора) теплофизическим аспектам которой были целью эта работа. Также рассматривается наличие электрического заряда на получающихся гранулах металла за счёт термоэмиссии с их поверхности.

Постановка задач исследования

Объединяя необходимые условия диспергирования веществ, рассмотрим возможность диспергирования металлов умеренной и повышенной тугоплавкости. К этим условиям диспергирования веществ с $T_{пл} \sim 1000 - 2000$ °С можно отнести: высокотемпературный прогрев, переводящий вещество в жидкую фазу; создание жидкой струи; наложение постоянной или периодической силы на струю, диспергирующую её на капли. Учитывая приведённые условия, выявим возможность реализации процесса диспергирования металлов различной тугоплавкости. При этом рассмотрим твёрдую, предварительно приготовленную из металла струю (проволоку), локально разогревая её торец плазмой и воздействуя на вновь образованную жидкость части струи постоянной либо периодической силой. Качественно процесс газоплазменного диспергирования металла происходит следующим образом. Исходный стержневой материал непрерывно с определённой скоростью подаётся в высокотемпературную область плазменного факела, где он получает некоторое количество теплоты, расходуемое на нагрев и плавление. После плавления металла расплав за счёт капиллярных сил собирается в каплю и удерживается на конце стержневого материала. Одновременно на каплю по мере её роста действуют увеличивающиеся гравитационные и аэродинамические силы плазменного факела, и когда сумма их величин становится больше величины капиллярных сил, капля отрывается от конца стержня. Для оптимизации получения монодисперсных капель металлов по приведённой схеме необходимо строгое соотношение ряда параметров рассматриваемого процесса диспергирования, таких, как скорость подачи

стержня в залежності от діаметра, теплопроводности его материала, температури, скорости плазмы в факеле и т. д.

Методика проведення експериментів

Использованная экспериментальная установка, описанная в работе [4], см. рис. 1, состоит из газоплазменного генератора, реализующий такие условия позволяет получать гранулы с большой частотой и состоит из горелки (или плазматрона) 1, устройства подачи 2 диспергируемого материала 3.

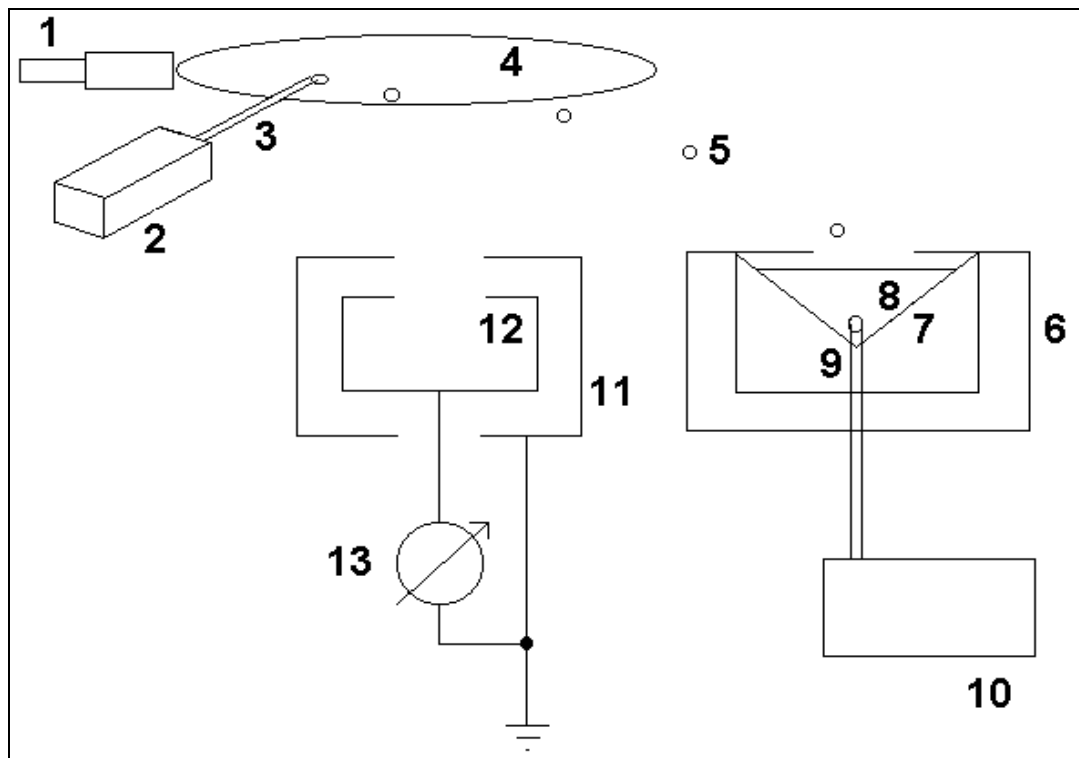


Рис. 1 Блок-схема экспериментальной установки

При непрерывной подаче стержневого материала в зону газоплазменного факела 4 происходит плавление разогретой части стержня и его диспергирование на отдельные частицы 5 в результате действия аэродинамической силы и силы тяжести. Температура получаемых частиц вычислялась теоретически, а также измерялась при помощи микрокалориметра, состоящего из наружного теплоизолирующего корпуса 6, внутреннего, выполненного из медной фольги, конуса 7, куда заливалось минеральное масло 8, и вставлялась термопара 9, присоединяемая к измерительному прибору 10. Заряд измерялся по стекающему через образцовое сопротивление току, при этом использовались цилиндр Фарадея, состоящий из внешнего 11 и внутреннего 12 проводящих

оболочек, и измеритель малых токов (В2-16) 13. Поскольку микрокалориметр невозможно было поднести близко к пламени с целью измерения температуры гранул сразу после выхода их из пламени (это не позволял и конструкционный материал микрокалориметра, и это привело бы к большой ошибке из-за нагрева микрокалориметра близким пламенем), то указанная температура вычислялась следующим образом. Пусть оторвавшаяся капля металла (после отрыва и остывания - гранула), массой m и теплоёмкостью c , имеет температуру $T_{\text{ч}}$, которая сразу после отрыва практически равна температуре плавления. После отрыва капля металла движется ещё некоторое время в зоне факела. Профили температур и скоростей факела считались П - образными. Внешний вид установки приведён на рис. 2.

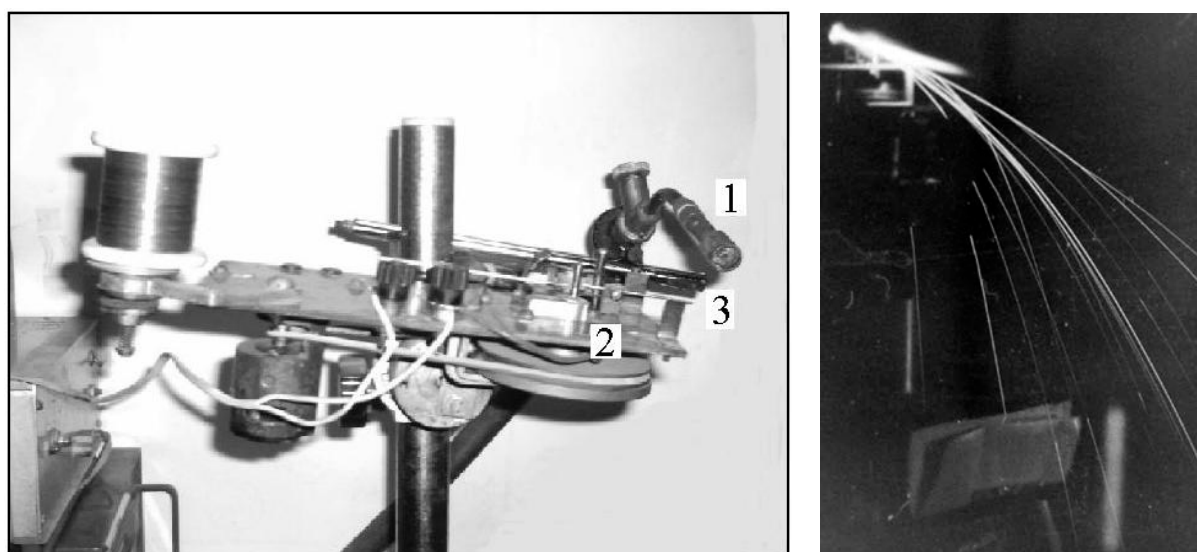


Рис. 2 Внешний вид устройства подачи прутка (слева) и процесс диспергирования (справа)

Результаты исследований

Радиационный поток Q тепла от факела к частице, с площадью поверхности S и температурой $T_{\text{ч}}$, будем считать несущественным, что справедливо для прозрачного пламени (использовалось слабо светящееся пламя пропана). Излучение частицы на стенки оценим на основании закона Стефана-Больцмана:

$$\frac{dQ_{\text{с}}}{dt} = \varepsilon_{\text{np}} S \sigma (T_{\text{ч}}^4 - T_{\text{см}}^4), \quad (1)$$

где t – время;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённый коэффициент лучеиспускания, здесь равный коэффициенту излучательной способности частицы $\varepsilon_{\text{ч}}$;

$T_{\text{см}}$ – температура окружающих гранулу стенок (300 K).

Конвективный тепловой поток dQ/dt определим в предположении изотропности температуры пламени на основании закона Ньютона [5]

$$\frac{dQ_2}{dt} = \alpha S (T - T_{\text{ч}}) \quad (2)$$

где α - коэффициент теплопередачи найдём, используя критерий Nu , а $= Nu \cdot u \cdot l/d$, $Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \approx 2$;

l - теплопроводность факела;

d - диаметр частицы соответственно).

Re - критерий Рейнольдса;

Pr - критерий Прандтля;

T – температура факела, равная 1350 °C.

Учитывая (1) и (2) запишем уравнение, описывающее изменение температуры частицы со временем

$$mc \frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = \alpha S (T - T_{\text{ч}}) - \varepsilon_{\text{ч}} \sigma S (T_{\text{ч}}^4 - T_{\text{см}}^4) \quad (3)$$

Для решения уравнение (3) дополнялось его начальными условиями $T_{\text{ч}}(t=0) = T_{\text{см}}$. Для медных частиц диаметром 250-350 мкм расчётная температура при выходе из используемого факела, смеси пропана и воздуха, составила 1200 °C. Решения уравнения (3) использовались при построении зависимости заряда частиц от их температуры.

Средняя температура получаемых ВМЧ при дальнейшем их движении в воздухе измерялась экспериментально при их накоплении в микрокалориметре по изменению температуры масла. Расчёт производился на основании уравнения теплового баланса

$$m_{\text{м}} c_{\text{м}} (T_{\text{м}2} - T_{\text{м}1}) + C_{\text{к}} (T_{\text{м}2} - T_{\text{м}1}) = m_{\text{ч}} c_{\text{ч}} (T_{\text{ч}} - T_{\text{м}2}), \quad (4)$$

где $m_{\text{м}}$ – масса масла, используемого в калориметре;

$c_{\text{м}}$ – теплоёмкость масла;

$T_{\text{м}1}$ и $T_{\text{м}2}$ – температура масла до и после сбора ВМЧ соответственно;

$T_{\text{ч}}$ – средняя температура ВМЧ перед попаданием в калориметр;
 $C_{\text{к}}$ – теплоёмкость микрокалориметра (определялась опытным путём);
 $m_{\text{ч}}$ – масса ВМЧ, остывших в калориметре;
 $c_{\text{ч}}$ – теплоёмкость частиц.

Так как гранулы имели высокую начальную температуру, то использование легкокипящей жидкости в качестве калориметрической за счёт испарения её части привело бы к повышению ошибки определения температуры. Микрокалориметр был изготовлен из тонкой медной фольги, которая образовывала ёмкость для масла, которая, в свою очередь, помещалась в корпус из пенопласта. Теплоёмкость калориметра составляла 8,7% от теплоёмкости масла, поэтому при расчёте учитывались обе теплоёмкости.

После измерений температуры частицы промывались в растворителе, взвешивались, затем проводился дисперсный анализ.

Заряд гранул определялся при помощи цилиндра Фарадея, состоящего из собирающей и экранирующей ёмкостей 11 и 12 (рис. 1), с использованием электрометрического вольтметра постоянного тока ВК2-16. Погрешность прибора при измерении заряда составляла $6 \cdot 10^{-15}$ Кл.

Оценим размер гранул, которые возможно получать при работе рассматриваемого газоплазменного генератора. Напомним, что в процессе генерирования капель металла участвуют следующие силы: поверхностного натяжения, гравитации, силы сопротивления набегающего на каплю нагретого потока газа.

Определяя радиус генерируемых капель, считаем, что сила сопротивления и сила тяжести направлены под углом 90° , а их равнодействующая и осевая составляющие силы поверхностного натяжения действуют вдоль одной прямой. Рассмотрим условие равновесия сил, из которого определим радиус генерируемой капли металла:

$$F_{\text{п}} = (m^2 \cdot g^2 + F_{\text{с}}^2)^{1/2}, \quad (5)$$

где $F_{\text{п}}$ – осевая составляющая силы поверхностного натяжения;

$$F_{\text{п}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \beta \cdot \cos f, \quad (6)$$

где β – коэффициент поверхностного натяжения (берётся при $T_{\text{пл}}$),

$$\cos f = r / r_{\text{к}}, \quad (7)$$

где r_k -радиус капли,

$$F_c = 6 \cdot \pi \cdot h \cdot r_k \cdot v \cdot [1 + 0,265 (vr_k/g)^{2/3}]. \quad (8)$$

Подставив (6) - (8) в (5), получим уравнение для определения r_k . Численное решение (5) при характерных параметрах струи гранул из медного стержня с $r = 7 \cdot 10^{-5}$ м даёт значение $r_k = 160$ мкм.

Таким образом, при достижении значений параметров, определённых из проведённых оценок процесса газоплазменного диспергирования, предложенная схема позволит получить монодисперсные капли жидких металлов умеренной и повышенной тугоплавкости.

Экспериментально были исследованы процессы диспергирования медного прутка (проволоки) в пропан-воздушном и пропан-кислородном факелах, диспергирование стальной и вольфрамовой проволоки в плазме плазмотрона. Данные по температуре плазмы (факела), температуре гранул на выходе из последних приведены в таблице 1.

Совокупность полученных результатов позволяют сделать следующие выводы. Как теоретические, так и экспериментальные данные показывают наличие электрического заряда на получаемых гранулах. При этом заряд на гранулах из различных металлов отличаются не более, чем на порядок. Также следует отметить, что получаемые гранулы на начальном этапе движения жидкие, с температурой превышающей температуру плавления диспергируемого металла, что позволяет наносить их на поверхность различной природы с вплавлением или хорошей адгезией получаемых гранул к этой поверхности.

Таблица 1 Экспериментальные данные по температуре факела и гранул

Параметр	Метал					
	Fe	Ti	Mo	W	Ta	Cu
Температура факела, T, K	16000	16000	16000	16000	16000	1720
Температура гранул, T, K	1760	1950	3000	3800	3100	1470
Заряд (в воздухе), $Q, Кл$	$-5 \cdot 10^{-14}$	$-4 \cdot 10^{-14}$	$-5 \cdot 10^{-14}$	$-17 \cdot 10^{-14}$	$-8 \cdot 10^{-14}$	$-2 \cdot 10^{-14}$

На рис. 3 для примера представлена зависимость температуры гранул меди от времени движения.

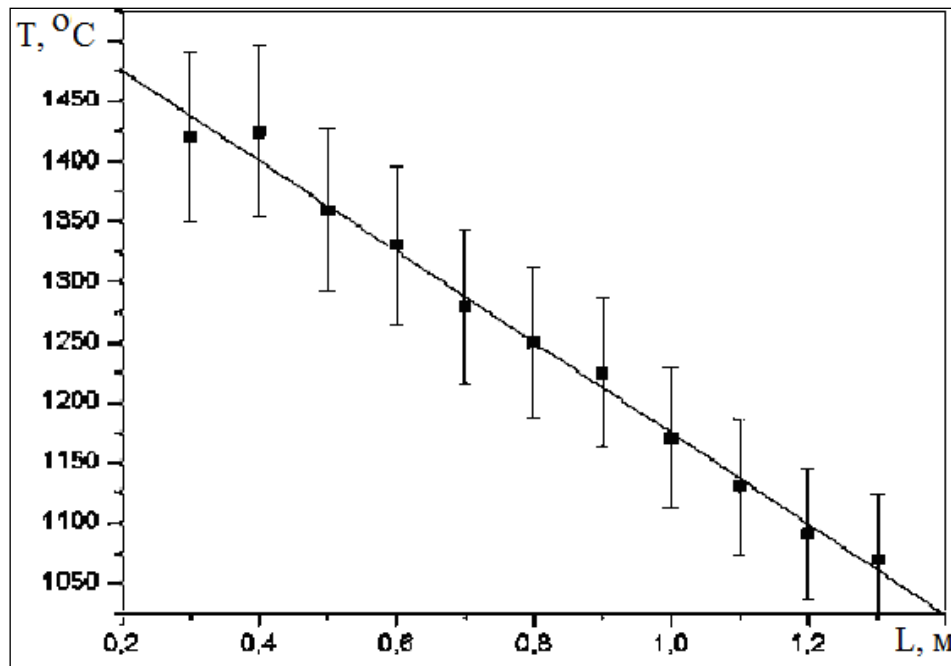


Рис. 3 Зависимость температуры гранул меди со средним диаметром 200 мкм, полученных в горизонтальном пропан-воздушном факеле

Дискуссионными следует считать представления о детальной физике возникновения заряда на гранулах. Ясно, что электроны за счет термоэмиссии покидают поверхность гранулы, но часть их прилипает на конденсированную дисперсную фазу (которая образуется вокруг частицы за счет конденсации продуктов испарения с ее поверхности), а часть за счет энергии сродства, уносится молекулами газовой среды. Тем не менее, авторы представили теоретическую модель появления заряда на гранулах [6, 7].

Выводы

Проведенные теплофизические расчёты процесса диспергирования металлических прутков металлов, выведенные соотношения газодинамических и гравитационных сил, действующих при диспергировании, позволяют его осуществить и оптимизировать. Наличие заряда на получаемых гранулах позволяет с помощью электрического поля управлять траекторией их движения, что важно в некоторых технических приложениях, например, в развивающихся в последнее время технологиях, в том числе в Украине, 3D печати металлом на 3D принтерах [8]. Приведенные данные по электрическому заряду получаемых гранул,

позволяют оптимизировать такое управление. Основным направлением дальнейших исследований в научном аспекте видится в использовании более детальных выражений для некоторых свойств металлов и газового факела, более полного учёта физических и химических свойств диспергирующего факела. В техническом аспекте представляется целесообразным конструирование 3D принтера и практическая отработка на нём полученных соотношений.

Литература

1. Гарифуллин, Ф.А. Лекции по технологии конструкционных материалов: Учебное пособие/ - Казань: Идел-Пресс, 2001.
2. Металловедение и технология металлов: Учебник для вузов/ Солнцев Ю.П., Веселова, В.А., Демянцевич, В.П. и др. М.:Металлургия, 1988, 512с
3. Дорохов, И.Н., Арутюнов, С.Ю., ЭСКИН Д.И. Математическое описание процессов струйного измельчения. // Теорет. основы хим. технологии. — 1993. — Т. 27, № 5, С. 514-517.
4. Семенов К.И. Исследование температуры и заряда частиц меди, получаемых в газоплазменном генераторе. Часть I. Эксперимент// Физика аэродисперсных систем. 2008. Вып. 45 с. 110-115.
5. Михеев, М.А., Михеева, И.М.. Основы теплопередачи. Учебник для вузов. М., "Энергия". 1977. — 343 с.
6. O.S. Chernenko, K.I. Semenov, L.A. Lyalin, V.V. Kalinchak, O.V. Mandel Heat exchange and charging of metallic particles surrounded by condensed dispersed phase of its oxide// Ukrainian journal of physics. 2011. №11. P. 1265 - 1269.
7. L.A. Lyalin, K.I. Semenov, A.K. Semenov, V.V. Kalinchak and N.KH. Kopyt THE Temperature dependence of an equilibrium thermoemitting charge of a metallic particle surrounded with a nanodisperse condensed phase// Ukrainian journal of physics. 2011. №11. P.1295-1299.
8. Brian Evans, Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing Apress 2012, ISBN 9781430243939, page 20