

18. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. - М.: Энергия, 1967. - 412 с.
19. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. - Киев; Донецк: Вища школа, 1979. - 280 с.
20. Субботин В. И., Ушаков П. А., Габрианович Б. И. и др. Исследование теплоотдачи жидких металлов в стальных трубах // ИФЖ. - 1963. - № 4. - С.16-21.
21. Линде Х., Шварц П., Вильке Х. Диссипативные структуры и нелинейная кинетика неустойчивости Марангони // Гидродинамика межфазных поверхностей. - М.: Мир, 1984. - С. 79-116.
22. Dubodolov V. I., Seredenko V. A., Seredenko E. V. Casting formation by electro-magnetic controlling in the liquid metal coolant // Magnetohydrodynamics. - 2003. - V. 39, № 4. - P. 389-394.
23. Середенко В. А. Анализ легирования стали жидкими ферросплавами с использованием магнитодинамического агрегата при выпуске плавки в ковш // Процессы литья. - 2004. - № 1. - С. 10-21.
24. Середенко В. О. Бар'єрні ефекти при обробці рідкої сталі алюмінієм // Металознавство та обробка металів. - 2004. - № 1. - С. 35-39.

Поступила 11.02.20009

УДК 621.039.534.25:534.24

**В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь, А. П. Шатрава,
Л. А. Бондарь, С. С. Самотугин**

ТЕПЛОБМЕН В СИСТЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХФАЗНОГО ГАЗОЛАЗЕРНОГО ПОТОКА С МИШЕНЬЮ

Рассмотрен теплообмен в системе фурма (потокоформирующий агрегат) – мишень (модельная жидкость) в процессе нагрева дисперсных частиц в газолазерном потоке. Исследовано взаимодействие двухфазного потока с жидкостью.

Розглянуто теплообмін в системі фурма (агрегат, який формує потік) – мішень (модельна рідина) в процесі нагрівання дисперсних частинок в газолазерному потоці. Досліджено взаємодію двофазного потоку з рідиною.

Heat exchange in the tuyere (flow forming unit) and target (model liquid) system in the process of dispersed particles heating in gas-laser stream is considered. Interaction of two phase flow with liquid is researched.

Ключевые слова: теплообмен, дисперсные частицы, газолазерный поток.

При исследовании теплообмена в двухфазных потоках широко применяются методы математического моделирования. Тем не менее, использование чисто расчетных методов хотя и расширяет возможности понимания глубины какого-то отдельного явления, однако часто ограничено при исследованиях комплексных систем, охватывающих одновременно несколько параллельно протекающих процессов. В ряде случаев на этапах подготовки технологического процесса более эффективным оказывается использование методов моделирования и упрощенных расчетов на основе экспериментальных исследований, что позволяет оценить весь спектр сопутствующих явлений, взаимосвязей между ними, определить критические параметры процесса и выявить диапазоны эффективного технологического решения.

Известные исследования по нагреву частиц лазерным излучением [1-3] в большинстве случаев рассматривают процесс обособленно, только те аспекты, которые касаются состояния частиц, чаще всего это распределение поглощенной энергии и изменение температуры на поверхности и в объеме частицы. Однако для создания ряда технологических процессов (например, таких как формирование композиционных наплавочных

покрытий и литых материалов) не менее важными являются также вопросы теплового состояния всего комплекса: агрегата (фурмы), в котором происходит нагрев частиц, тепло-содержания газового потока, а также теплового состояния мишени (твердого материала, металлического расплава или модельной жидкости).

В настоящей работе рассмотрено тепловое состояние узла технологического оборудования (системы), включающего в себя фурму, в которой формируются двухфазный газолазерный поток, и мишень (рис. 1).

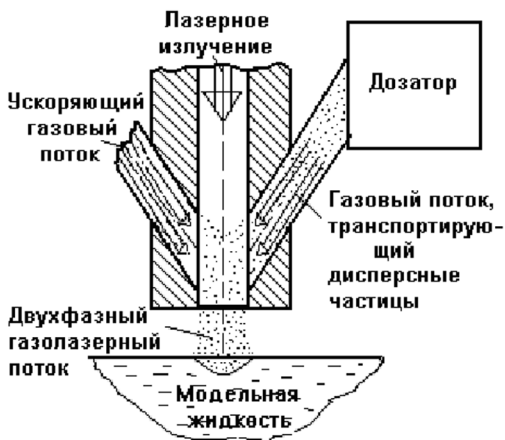


Рис. 1. Схема, моделирующая взаимодействие транспортируемых и нагреваемых лазерным излучением частиц с мишенью

В соответствии с критериями подобия [4] в качестве модельной жидкости выбрана вода. Сыпучие ингредиенты представлены неметаллическим порошком оксида железа фракцией 100-200 мкм.

Порошок из дозирующего устройства в потоке транспортирующего газа Q_T попадает в фурму и захватывается там потоком ускоряющего газа Q_y , проходящим в фурме вертикально вниз. Соосно с Q_y , не касаясь стенок канала фурмы, проходит лазерный луч. На некотором расстоянии от фурмы установлена мишень, в данном случае мишенью является емкость с модельной жидкостью, куда направлен двухфазный газолазерный поток.

Процентное содержание порошковой составляющей в объеме модельной жидкости (суспензии) определяется соотношением V_n/V_j , где V_j – объем модельной жидкости в емкости, V_n – объем поданного в жидкость порошка. Поскольку подача порошка осуществляется в газолазерном потоке, то для более удобного описания процессов нагрева частиц в поле лазерного излучения и общих процессов теплообмена в системе введен параметр объемной концентрации частиц в потоке, который для установившегося стационарного процесса может быть представлен через расходные характеристики материалов

$$\beta = \frac{Q_n}{Q_n + Q_r}, \quad (1)$$

где β – объемная концентрация; Q_n – расход порошка; Q_r – расход газа, равный $Q_r = Q_y + Q_T$.

Исследования проводились в области значений β , соответствующих слабозапыленным потокам и газозвесьям.

Определение расходов транспортирующего и ускоряющего газов проводили на основании расчета нагрева частиц в поле лазерного излучения. Для расчетов приняли, что частица – сферическое тело, а поскольку в поставленной задаче нагрев частиц заведомо ограничен температурой плавления, то использование результатов ограничивается изотропией оптического поля внутри частицы.

В изотропном поле изменение температуры (T) сферической частицы, отвечающей условиям изотропии, то есть плотность теплового источника (P) не зависит от радиуса частицы (r) и отвечает требованиям $8\pi\chi r/\lambda \gg 1$, можно описать параболическим уравнением следующего вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) + \frac{6\pi\chi P}{c\gamma\lambda} \exp[-0,2(\sqrt{n^2 - \chi^2} - 1)] \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$T(r, t) = T_0(t), T(\rho, 0) = T_\infty, \quad (3)$$

где a – температуропроводность; c – удельная теплоемкость; n, χ – показатели преломления и поглощения материала частицы; γ, λ – плотность и коэффициент теплопроводности материала частицы.

Решение задачи записывается в виде [5]

$$T(p, t) = T_0 - \frac{2r}{\pi p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin \frac{\pi k \rho}{r} \cdot \int_0^t \left(\frac{6\pi\chi P}{c\gamma\lambda} \exp \left[-0,2(\sqrt{n^2 - \chi^2} - 1) \right] - \frac{\partial T_0}{\partial \tau} \right) \times \exp \left[-\left(\frac{a\pi k}{r} \right)^2 \cdot (t - \tau) \right] \cdot d\tau. \quad (4)$$

Приняв предельные значения нагрева поверхности частиц до температур, близких к температурам плавления, необходимо рассчитать время нахождения частицы под лазерным излучением и время ее полета до мишени в зависимости от расхода газов (транспортирующего порошок и ускоряющего).

Частицы из транспортирующего канала, попадая в канал фурмы, приобретают импульс движения посредством ускоряющего потока газа. При этом начало ускоренного движения (разгона) частицы начинается с момента отрыва пограничного слоя при внезапном ее приводе. Вследствие этого время полета частиц в канале фурмы складывается из времени отрыва, разгона и равномерного движения частиц в газолазерном потоке.

Время отрыва для сферической частицы, полученной на основе теории пограничного слоя, рассчитываем согласно [6]

$$t_{\text{отр}} = 0,392 \cdot \frac{r}{v_{\text{отр}}} = \frac{1,23 \cdot R^2 \cdot r}{Q_y - Q_\Gamma}, \quad (5)$$

где $v_{\text{отр}}$ – скорость потока газа, обеспечивающая отрыв пограничного слоя; R – радиус канала дозирующего устройства; r – радиус частички.

Время разгона определяем по известной зависимости [7]

$$t_p = \frac{1}{k} \ln \frac{v_\Gamma - v_\Gamma^0}{v_\Gamma - v_\Gamma}, \quad (6)$$

где v_Γ – скорость общего газового потока; v_Γ^0 – начальная скорость частицы; v_Γ – скорость частицы после разгона; k – коэффициент, описываемый выражением

$$k = \frac{3}{16} \cdot \frac{C \eta_\Gamma}{r \rho_\Gamma}, \quad (7)$$

где η_Γ – динамическая вязкость газа; ρ_Γ – плотность частички; C – постоянная сопротивления движению частицы, зависит от числа Рейнольдса, которое представим в виде

$$\text{Re} = \frac{2r\rho_\Gamma}{\eta_\Gamma} (v_\Gamma - v_\Gamma), \quad (8)$$

где ρ_Γ – плотность газа.

В соответствии с данными работы [8] $C = 24,8$.

На практике время разгона частиц удобнее представлять через расходные характеристики газа

$$t_p = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{Q_y}{Q_r - \pi R^2 v_{\text{ч}}} \right). \quad (9)$$

Скорость частицы в конце участка разгона $v_{\text{ч}}$ равна

$$v_{\text{ч}} = \frac{1}{\pi \cdot R^2} \left[Q_y - (Q_y - Q_r) \cdot \exp \left\{ -k \frac{h \pi R^2}{Q_r} \right\} \right], \quad (10)$$

где h — длина пути полета частицы.

После несложных преобразований и интегрирования зависимости (9) можно получить выражение для определения длины пути разгона.

Несмотря на то, что время отрыва и разгона по порядку величин отличается от времени лазерного нагрева частиц до температур начала их оплавления, которое в свою очередь может регулироваться плотностью мощности излучения, для ряда технологических процессов увеличение времени нахождения частиц в поле лазерного излучения следует однако учитывать.

Таким образом, время нагрева частиц в газолазерном потоке с учетом времени отрыва и разгона увеличивается, что способствует большему их нагреванию.

Частицы, нагретые лазерным излучением, в процессе полета попадают в модельную жидкость и происходит естественный нагрев жидкости за счет передачи тепла частичек воде. Температуру воды измеряли в течение промежутка времени, равном 20 с, контролируя при этом расход и объем поданной порошковой массы.

Нагрев и испарение модельной жидкости происходят вследствие падающего лазерного излучения и нагретых лазерным излучением частиц непосредственно на поверхность. Изменения объема испаренной жидкости, температуры воды и фурмы в зависимости от плотности потока частиц при одинаковых расходах транспортирующего и ускоряющего газов (суммарный расход газа $261 \text{ см}^3/\text{с}$) и мощности лазерного излучения (517 Вт) представлены на рис. 2.

С увеличением объемной концентрации частиц в газовом потоке (β) снижается степень прямого попадания лазерного излучения на поверхность модельной жидкости и уменьшается объем испарений. Определены плотность потока и режимы подачи неметаллического (Fe_2O_3) порошка, при которых испарение воды отсутствовало, что является граничным условием возможности воздействия лазерного излучения на мишень в условиях запыленного газового потока.

Замечено, что в условиях прохождения луча через фурму к твердой мишени без подачи порошковых материалов нагрев фурмы несущественный, однако, если мишенью является жидкость, то наблюдается ее нагрев за счет испарений [9]. При этом повышение температуры фурмы во времени при испарении воды на расстоянии от мишени 15 мм составляет $0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

Долю отраженного излучения частицами, летящими в газолазерном потоке, определяли по температуре фурмы за вычетом нагрева ее парами модельной жидкости (рис. 2, кривая 3). Подача даже

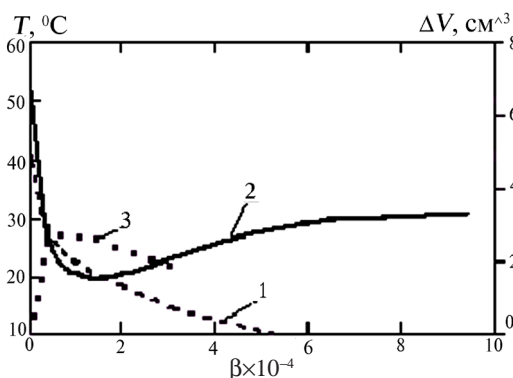


Рис. 2. Изменение объема (1) и температуры воды (2), а также температуры фурмы (3) в зависимости от объемной концентрации (β) неметаллического порошка в газолазерном потоке

незначительного количества частиц в газолазерный поток приводит к повышению температуры фурмы. Дальнейшее увеличение объемной концентрации частиц в потоке способствует стабилизации доли отраженного излучения и в дальнейшем некоторому снижению температуры фурмы, что, очевидно, обусловлено экранированием и поглощением доли отраженного излучения в середине потока соседними частицами.

В области слабозапыленных потоков при небольших объемных концентрациях (β) неметаллического порошка (рис. 2, кривая 2) наблюдается уменьшение температуры воды за счет отражения частицами части энергии лазерного излучения и передачи ее фурме. С достижением граничных плотностей газолазерного потока, исключающего прямое попадание излучения на поверхность жидкости, наблюдается незначительное изменение температуры воды вследствие стабилизации объема энергии, поглощенной частицами. При этом по мере увеличения объемной концентрации (β) количество энергии, приходящееся на нагрев одной частицы, уменьшается. Замеры температуры воды в области концентратий (β), превышающих граничные, использовались для определения температуры нагрева одной частицы. Для различных значений (β) при одинаковых времени подачи порошка и объеме модельной жидкости определялись объемы и массы засыпанного порошка. Далее, с учетом среднего размера частицы, рассчитывалось количество частиц для каждого из (β). На основании полученных данных определялось среднее значение лазерной энергии, приходящейся на нагрев одной частицы. Результаты расчетов на основе экспериментальных данных показали, что диапазон нагрева одной частицы может колебаться от 300 до 1400 °С при мощности лазерного излучения 517 Вт. Расходимость значений температур, полученных на основе теоретических расчетов и средних значений температур, определенных из экспериментальных данных, находится в пределах 10-30 %, что объясняется неравномерностью нагрева частиц в газолазерном потоке.

К недостаткам данной схемы нагрева частиц лазерным излучением можно отнести следующее:

- лазерное излучение подается в канал фурмы сфокусированно, вследствие чего может наблюдаться неравномерный нагрев всего объема частиц; часть частиц, попадающих под луч вблизи фокуса, получает излучение наиболее высокой плотности и соответственно максимально нагревается, тогда как другая часть может получать меньшее количество энергии;

- неметаллические частицы в условиях лазерного облучения нагреваются объемно, однако в ряде технологических процессов важным является как объемный, так и поверхностный нагрев.

Для устранения этих недостатков можно:

- в канал фурмы подавать не сфокусированное излучение, а равномерно распределенное, что обеспечит более одинаковый нагрев всего объема частиц;
- усилить поверхностный нагрев частиц косвенным конвективным нагревом посредством газовой фазы, для этого в качестве ускоряющего газа подавать нагретый газ, газопламенное или плазменное излучение.

Таким образом, с помощью методов моделирования и расчетов проведена сравнительная оценка теоретических и экспериментальных результатов процесса нагрева частиц в газолазерном потоке системы фурма – мишень. Установлена взаимосвязь температуры частиц с расходными характеристиками газа и порошкового материала, пороговые значения, определяющие воздействие лазерного излучения на мишень в условиях двухфазного газолазерного потока. По относительному изменению температуры фурмы определена доля лазерной энергии, отраженной от частиц, при различных объемных концентрациях частиц в потоке.



Список литературы

1. Астафьева Л. Г., Пришивалко А. П., Лейко С. Т. Нагрев металлических частиц лазерным излучением // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 2. - С. 64-69.
2. Бушма А. И., Кривцун И. В. Особенности нагрева мелкодисперсных керамических частиц лазерным излучением // Там же. - 1992. - № 2. - С. 40-48.
3. Пришивалко А. П., Астафьева Л. Г., Лейко С. Т. Тепловое разрушение частиц алюминия излучением CO₂-лазера // Там же. - 1996. - № 6. - С. 34-40.
4. Лихошва В. П., Найдек В. Л., Ренталь Е. А., Шатрова А. П., Бондарь Л. А. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов // Процессы литья. - 2009. - № 3. - С. 11-15.
5. Кузиковский А. В. Динамика сферической частицы в мощном оптическом поле // Изв. вузов. - 1970. - № 5. - С. 89-94.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1969. - 744 с.
7. Скворцов Г. Е. О движении частиц в свободной струе // Инж.-физ. журн. - 1964. - № 5. - С. 13-15.
8. Пустовойтенко А. И. О расчете нагрева мелкодисперсных частичек в высокотемпературной струе газа // Физ. и хим. обраб. материалов. - 1976. - № 3. - С. 138-141.
9. Лихошва В. П. Моделирование гидродинамических эффектов при лазерной обработке расплавов // Процессы литья. - 2005. - № 2. - С. 26-32.

Поступила 19.01.2009

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В редакции журнала «Процессы литья» Вы можете приобрести русско-украинский терминологический словарь «Металлургия».

Составители: **В. Л. НАЙДЕК, К. Ф. ЕВЛАШ, С. С. ЗАТУЛОВСКИЙ**

Словарь содержит около 14000 наиболее распространенных терминов и словосочетаний, относящихся к металлургии, литейному производству и термической обработке, а также к смежным областям науки и техники - металловедению, физике металлов, сварочному и кузнечному производствам.

Предназначен для преподавателей, студентов и аспирантов технических высших учебных заведений, сотрудников научно-исследовательских организаций материаловедческого профиля, инженерно-технических работников металлургических и родственных к ним специальностей.

Стоимость - 25 грн.

Заявки на приобретение словаря присылайте по адресу:
03680, Киев-142, пр. Вернадского, 34/1

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
Редакция журнала «Процессы литья»

Тел.: (044) 424-12-50; факс: (044) 424-35-15

E-mail: proclit@ptima.kiev.ua