

УДК 621.746.043-982:669.018

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ДИСПЕРСНЫХ СТАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

© 2019 г. Б. С. Воронцов^а, Н. В. Нестеров^{а,*}

^аКурганский государственный университет, 640669 Россия, Курган, ул. Советская, д. 63, стр. 4

*e-mail: nesterovnv@rambler.ru, fizika@kgsu.ru

Поступила в редакцию 05.06.2018

Разработана математическая модель взаимодействия жидкого металла с внедренными в пенополистирол литейной модели металлическими включениями, учитывающая кинетику заполнения формы, влияние термодеструкции пенополистирола и теплообмен основного сплава и материала наполнителя. Приведены результаты эксперимента по получению опытных образцов литьем по газифицированным моделям, подтверждающие прогнозы математического моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, взаимодействие металлических частиц с расплавом, локальное легирование, литье по газифицированным моделям, композиционные материалы.

DOI: 10.1134/S0235010618050158

ВВЕДЕНИЕ

Создание технологии получения композиционных материалов является приоритетным направлением развития соответствующих отраслей науки и техники, так как возможности дальнейшего совершенствования существующих металлических сплавов практически исчерпаны [1]. При использовании традиционных технологий, после того как получено литое изделие производится либо наплавка, либо сварка, либо механическое крепление [2–4] поверхностей или деталей изделия работающих в экстремальных условиях. Изготовление изделий литьем по газифицируемым моделям дает принципиальную возможность исключить эти дополнительные операции за счет локального легирования [5] и модифицирования отдельных областей изделия и размещения в литейной форме нужных металлических элементов. Таким образом, реализуется композиционное изделие, содержащее в разных своих частях различные по составу и свойствам материалы.

МЕТОДИКА ЛЕГИРОВАНИЯ

Дополнительные преимущества данная технология получает из-за простоты осуществления различных способов размещения наполнителя в заданной части модели, путем расположения их в заданных закрытых полостях, нанесения в виде краски на поверхность модели, а также на поверхность гранул перед их спеканием и т.п. [6, 7].

Примеры подобных технических решений, отличающихся способами равномерно насыщения гранул пенополистирола легирующим веществом с применением электрического разряда и потоков газа, предложены нами в патентах [8, 9].

Цель данной работы дальнейшее изучение физических процессов и выявление принципиальных возможностей и областей применения данной технологии, а также разработка математической модели для определения оптимальных показателей технологии. Технология изготовления композиционных металлических изделий методом ЛГМ с применением дисперсных наполнителей, размещаемых в модели из пенополи-

стирола, должна обеспечивать получение изделий с различными свойствами в различных частях этих изделий. При этом должны обеспечиваться механические и эксплуатационные свойства получаемых материалов на 15–30% выше, чем у существующих и возможность управлять процессом затвердевания литого сплава для получения плотных изделий.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Математическая модель взаимодействия расплава основного металла с введенными в газифицируемую модель металлическими включениями наполнителя представляет собой систему уравнений. Эта система имеет решения, в виде функциональных взаимосвязей параметров модели, физических свойств задействованных в ней материалов и термодинамических параметров. Аналогичная модель была разработана и проанализирована в различных аспектах [10, 11] для основного сплава без дополнительных включений в пенополистирол.

В работе [10] рассчитано температурное поле, которое является определяющим для сложного высокотемпературного металлургического процесса, протекающего при литье по газифицированным моделям.

Температура жидкого металла вдоль вертикальной оси от $y = 0$ до $y = H$ определится следующим выражением [10]:

$$T(y, t, k) = \frac{T_1(y, t) + T_2(y, t, k)}{2} + \frac{T_1(y, t) - T_2(y, t, k)}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y-h}{2\sqrt{a_{M1}(t-t_1)}}} e^{-x^2} dx, \quad (1)$$

где x – переменная интегрирования.

Внесение в литейную форму дополнительных металлических включений усложняет протекающий процесс и, соответственно, требует усовершенствования математической модели и внесение в нее дополнительных условий.

В частности, при заполнении формы скорость подъема металла должна быть такой, чтобы металлические включения после термодеструкции пенополистирола оставались на месте, не “уносились” потоком металла со своего места и не “тонули” в жидком металле. По проведенным расчетам эта скорость должна находиться в пределах $(0.30-1.20) \cdot 10^{-2}$ м/с и зависит от размера металлических частиц легирующих добавок.

Включение в модель металлических частиц определило дополнительный эффект – снижение температуры основного сплава в зоне, в которой расположены металлические объекты наполнителя:

$$\begin{aligned} \Delta T(y, t, k) &= T_1(y, t) - T(y, t, k) = \\ &= \frac{T_1(y, t) - T_2(y, t, k)}{2} - \frac{T_1(y, t) - T_2(y, t, k)}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y-h}{2\sqrt{a_{M1}(t-t_1)}}} e^{-x^2} dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Величина $T_1(y, t)$ рассчитана в работе [12]:

$$T_1(y, t) = T_0 - \frac{AT_0 + B}{c_{M1}\rho_{M1}\sqrt{\pi a_{M1}}} \int_0^t \frac{v(t)\rho_{E1}(t)}{\sqrt{t-\theta}} e^{-\frac{y^2}{4a_{M1}(t-\tau)}} d\theta, \quad (3)$$

θ – переменная интегрирования, $A = 4032$ Дж/кг · К и $B = 3773$ Дж/кг · К – коэффициенты в формуле для расчета энергии термодеструкции пенополистирола ($W = AT + B$) [10].

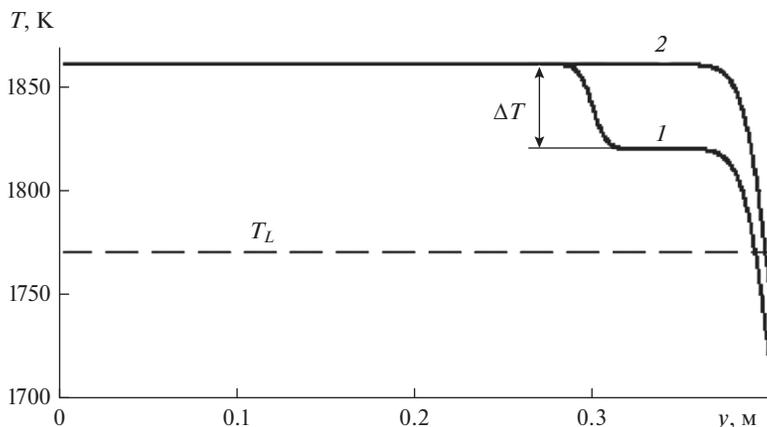


Рис. 1. Графики изменения температуры жидкой углеродистой стали (35Л ГОСТ 977-88) вдоль вертикальной оси y на момент завершения заливки при расположении частиц металла в верхней части отливки $y > 0.3$ м с объемной долей наполнителя $k = 0.05$ – кривая 1, и при отсутствии наполнителя в модели – кривая 2.

Величина $T_2(y, t, k)$ определяется из условий теплообмена жидкого сплава и дисперсных частиц, при котором происходит их нагрев.

$$T(y, t, k) = \frac{T_1(y, t) + T_2(y, t, k)}{2} + \frac{T_1(y, t) - T_2(y, t, k)}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{y-h}{2\sqrt{a_{M1}(t-t_1)}}} e^{-x^2} dx, \quad (4)$$

где x – переменная интегрирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные соотношения, составляющие данную математическую модель, позволяют рассчитать величину падения температуры жидкого сплава после термодеструкции пенополистирола модели, перемешивания с твердыми металлическими частицами наполнителя и их расплавления. Примерный вид графика изменения температуры расплава, после заполнения зоны модели, где расположен наполнитель, показан на рис. 1. Расчеты для графика произведены на примере заполнения модели из пенополистирола жидкой углеродистой сталью 35Л ГОСТ 977-88. Модель выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого: площадь основания $S = 0.05$ м², высота $H = 0.4$ м, высота расположения зоны насыщенной дисперсным наполнителем (рис. 1). Верхняя часть модели, расположенная на высоте $h = 0.3$ м от основания содержит наполнитель из стального порошка того же состава, что и основной металл. Кривая 1 – изменение температуры жидкой стали вдоль оси y при наличии в верхней части модели дисперсных частиц наполнителя с объемной долей $k = 0.05$ и кривая 2 при их отсутствии, т.е. кривая 2 показывает изменение температуры металла вдоль вертикальной оси отливки только вследствие термодеструкции пенополистирола.

Для расчетов с помощью математической модели заполнения формы [11] получено, что $t_0 = 26.7$ с, а $t_1 = 22.6$ с.

Технологические показатели приняты следующими: размеры опоки $800 \times 800 \times 600$ мм, $p_V = -20$ кПа, $l = 0.40$ м, $S_R = 1.30 \cdot 10^{-3}$ м², $z = 0.06$ м,

$D = 4.5 \cdot 10^9 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}^3 \cdot \text{К}$, $h_k = 0.1 \text{ м}$, $b = 8.49 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4/\text{Н} \cdot \text{с}$ (около 50 единиц),
 $\rho_{P0} = 25 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 1860 \text{ К}$, $q = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $\mu = 0.65$.

Свойства материалов: $\rho_{M1} = 7000 \text{ кг/м}^3$, $c_{M1} = 920 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $a_{M1} = 3.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\rho_{M0} = 7800 \text{ кг/м}^3$, $c_{E0} = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho_{E0} = 7000 \text{ кг/м}^3$, $c_{E0} = 920 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$,
 $\Lambda_E = 84000 \text{ Дж/кг}$, $T_{E0} = 300 \text{ К}$ [12].

Из графика на рис. 1 видно, что температура жидкого сплава в области размещения наполнителя в пенополистироле модели в конце процесса заливки ступенчато снижается и это снижение накладывается на снижение температуры сплава вследствие термодеструкции пенополистирола.

При кристаллизации в процессе затвердевания каждая частица модификатора становилась зародышем твердой фазы, и вокруг нее образовывалось зерно микроструктуры металла. Проведенные проверочные опыты и металлография показали, что при большом числе зародышей и их высокой плотности размер зерен в затвердевшем металле меньше чем 10 мкм. После соответствующей обработки металла при испытаниях установлено, что его временное сопротивление достигает 1450 МПа. При этом остальные механические свойства на 3–5% превышали свойства, установленные ГОСТ 977–88.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель процесса литья по газифицированным моделям, учитывающая наличие металлических частиц в гранулах пенополистирола и взаимодействие этих частиц с основным заливаемым металлом. Использование результатов моделирования позволяет сделать обоснованный выбор параметров технологического процесса, обеспечивающих получение качественного изделия с улучшенными (за счет местного легирования) локальными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фальхман Б. Химия новых материалов и нанотехнологии. Пер. с англ.: Научное издание / Б. Фальхман—Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2011. 464 с.
2. Суслов А. Г. Инженерия поверхностей деталей. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
3. Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура: справочное пособие. Л. Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1981. 368 с.
4. Применение плазменной наплавки, сварки с использованием проволок. Delta-grup.ru/bibliot/23/23htm.
5. Suzucki M., Goraj T., Lelito J., Suchy J. S. Numerical analysis of solid particles flow in liquid metal // Archives of foundry engineering. 2013. **13**. № 3. P. 161–166.
6. Wannasin J., Flemings M. C. Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process // J. Materials Processing Technology. 2005. **169**. № 2. P. 143–149.
7. Bolton W., Higgins R. A. Materials for engineers and technicians. New York: Routledge, 2015. 472 p.
8. Нестеров Н. В., Воронцов Б. С., Ермилов А. Г. Способ модифицирования отливок при литье по газифицированным моделям. Патент РФ № 2633806. 2017.
9. Нестеров Н. В., Воронцов Б. С., Ермилов А. Г. Способ модифицирования и легирования литых металлических изделий при литье по газифицируемым моделям. Патент РФ № 2638722. 2017.
10. Нестеров Н. В., Воронцов Б. С. Математическая модель охлаждения жидкого металла при литье по газифицируемым моделям. Литейщик России. 2014. № 8. С. 24–29.
11. Nesterov N. V., Ermilov A. G. Mathematical Model of Kinetics of Filling the Model during Casting by Gasified Models // Russian J. Non Ferrous Metals. 2010. **51**. № 1. P. 52–58.
12. Mehta S., Shivkumar S. Fluidity of alloys and composites in the lost foam process // Transactions of the American Foundrymen’s Society. 1995. **103**. P. 95–89. P. 663–668.

Model Investigation of Liquid Interaction Metal and Dispersed Steel Inclusions in Casting on Gasificable Models

B. S. Vorontsov¹, N. V. Nesterov¹

¹Kurgan State University, 640669 Russia, Kurgan, st. Sovetskaya, 63/4

A mathematical model for the interaction of liquid metal with metallic inclusions embedded in the foam polystyrene, reflecting the filling of molds, the effect of thermal decomposition of expanded polystyrene and heat exchange of the base alloy and filler material, is developed. The resulted results of the experiment on obtaining prototypes by casting on gasified models, confirming the predictions of mathematical modeling.

Keywords: mathematical model, interaction of metal particles with melt, local alloying, casting for gasified models, composite materials

REFERENCES

1. Falkhman B. Chemistry of New Materials and Nanotechnology. [*Khimiya novykh materialov i nanotekhnologii*]. Per. s angl.: Nauchnoye izdaniye / B. Fal'khman—Dolglprudnyy: Izdatel'skiy dom "Intellekt", 2011. 464 p. [In Rus.].
2. Suslov A.G. Engineering surfaces of parts. [*Inzheneriya poverkhnostey detaley*]. M.: Mashinostroyeniye. 2008. 320 p. [In Rus.].
3. Gurevich D.F. Pipe fittings: reference book. [*Truboprovodnaya armatura: spravocnoye posobiye*]. L. Mashinostroyeniye, Leningr. Otdeleniye, 1981. 368 p. [In Rus.].
4. Application of plasma surfacing, welding using wires. Delta-grup.ru/bibliot/23/23htm.
5. Suzucki M., Goraj T., Lelito J., Suchy J.S. Numerical analysis of solid particles flow in liquid metal // Archives of foundry engineering. 2013. **13**. № 3. P. 161–166.
6. Wannasin J., Flemings M.C. Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process // J. Materials Processing Technology. 2005. **169**. № 2. P. 143–149.
7. Bolton W., Higgins R.A. Materials for engineers and technicians. New York: Routledge, 2015. 472 p.
8. Nesterov N.V., Vorontsov B.S., Ermilov A.G. Method of modifying castings for casting gasified models. Patent of the Russian Federation № 2633806. 2017.
9. Nesterov N.V., Vorontsov B.S., Ermilov A.G. Method for modifying and doping cast metal products during casting for gasifying models. Patent of the Russian Federation № 2638722. 2017.
10. Nesterov N.V., Vorontsov B.S. Mathematical model of liquid metal cooling during casting on gasified models. [*Matematicheskaya model' okhlazhdeniya zhidkogo metalla pri lit'ye po gazifitsiruyemyh modelyam*]. Liteyshchik Rossii. 2014. № 8. P. 24–29. [In Rus.].
11. Nesterov N.V., Ermilov A.G. Mathematical Model of Kinetics of Filling the Model during Casting by Gasified Models // Russian J. Non Ferrous Metals. 2010. **51**. № 1. P. 52–58.
12. Mehta S., Shivkumar S. Fluidity of alloys and composites in the lost foam process // Transactions of the American Foundrymen's Society. 1995. **103**. P. 95–89. P. 663–668.