

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЗАГОТОВКИ ПРЕВЕНТОРА

Гилева Э.А., Соколова О.О., Труфанов Н.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, eg mp@mail.ru*

В данной работе была рассмотрена математическая модель сопряженных гидродинамических и тепловых процессов в отливке и форме при изготовлении литейной заготовки превентора – ответственного рабочего элемента комплекта противовыбросового оборудования добывающей промышленности. Также были построены дискретные аналоги реальных технологических процессов средствами программного кода ProCAST, в полной нестационарной трехмерной постановке решена поставленная задача. На основе численного моделирования изучена эволюция температурных полей в процессе кристаллизации слитка превентора, представлены картины динамики формирования твердой фазы с течением времени и проанализировано распределение усадочной пористости в реальном превенторе и его численной модели. Картина распределения пористости, полученная в ходе численного решения поставленной задачи, подтверждена экспериментально на препарированном образце литой заготовки.

Ключевые слова: численное моделирование, заливка, кристаллизация, пористость, превентор.

## NUMERICAL SIMULATION OF PREVENTER INGOT SOLIDIFICATION

Gileva E.A., Sokolova O.O., Trufanov N.A.

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, eg mp@mail.ru*

Technological stages of steel borehole preventor casting are studied during this research. Preventor is a very important part of blow-out equipment. A mathematical model of the integrated hydrodynamic and thermal processes in the mould and casting is formulated. Discrete analogues for some technological processes are derived. The problem is solved as three-dimensional using numerical procedures and means of ProCAST software. Images of solid part formation within the time are provided. Shrinkage porosity allocation for both numerical model and preventor itself is analyzed. Analysis and comparison of the numerical simulation and full-scale experiment (prepared sample of real preventor) results proved validity of computational experiment.

Keywords: numerical simulation, finite elements method, casting, solidification, porosity, borehole, preventor.

Известно [1], что структура литого изделия во многом зависит от характера протекания процесса затвердевания, когда закладываются основные физико-химические свойства отливки. Формирование макроструктуры отливки определяется технологическими режимами заливки и охлаждения расплава в форме, а также конструктивными особенностями изделия (конусность, отношение высоты отливки к диаметру). Поскольку экспериментальное исследование процессов затвердевания отливок трудозатратно и дорогостояще, широкое распространение получили методы математического моделирования, ориентированные на привлечение современной вычислительной техники и численных методов [2–8].

В работах [4–5] изучена конвекция в жидком расплаве металла и макросегрегация при образовании литой структуры. Модель, основанная на кристаллизации многокомпонентного сплава с учетом конвекции, предполагает совместное решение уравнений, описывающих процессы тепло-массопереноса в твердой, твердожидкой и жидкой фазах. Результаты оптимизации конструкции изложницы при изготовлении массивных отливок и слитков представлены в [7,8]. Исследованию влияния свободной конвекции на температурные поля в расплаве и качество литой структуры при затвердевании (кристаллизации) крупного слитка

массой 142 т посвящена работа [9]. Имеются варианты [10] учета связанности тепловых и гидродинамических полей с учетом турбулентных режимов течения расплава.

В данной работе исследуются процессы заливки и кристаллизации при изготовлении превентора. Превентор – это ответственный рабочий элемент комплекта противовыбросового оборудования [12], устанавливаемый на устье нефте- и газодобывающей скважины.

### Математическая постановка задачи

Процесс производства отливки превентора можно условно разделить на два этапа: разливку и затвердевание расплава. На первом этапе жидкую сталь из ковша разливают в заранее заготовленные формы (рис.1). Форма состоит из стального остова, представляющего собой параллелепипед с отсутствующими передней и задней гранями, и формы из альфасет-смеси. Вторая стадия получения отливки – затвердевание жидкого металла в форме. На этой стадии важно получить однородный по химическому составу, механическим и физическим свойствам, а также не содержащий значительных дефектов металл. Характерные размеры отливки: нижний диаметр 480 мм, верхний диаметр 760 мм, высота детали 1254 мм.

Формирование структуры происходит в двухфазной зоне, представляющей собой гетерогенную область из растущих кристаллов с окружающим расплавом. Средний размер кристаллов прямо пропорционален ширине этой зоны, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна отводимому потоку тепла. Теплофизические явления, происходящие в двухфазной зоне, включают взаимосвязанные процессы тепломассопереноса, фильтрацию расплава в междендритном пространстве, формирование растущих кристаллов [13].

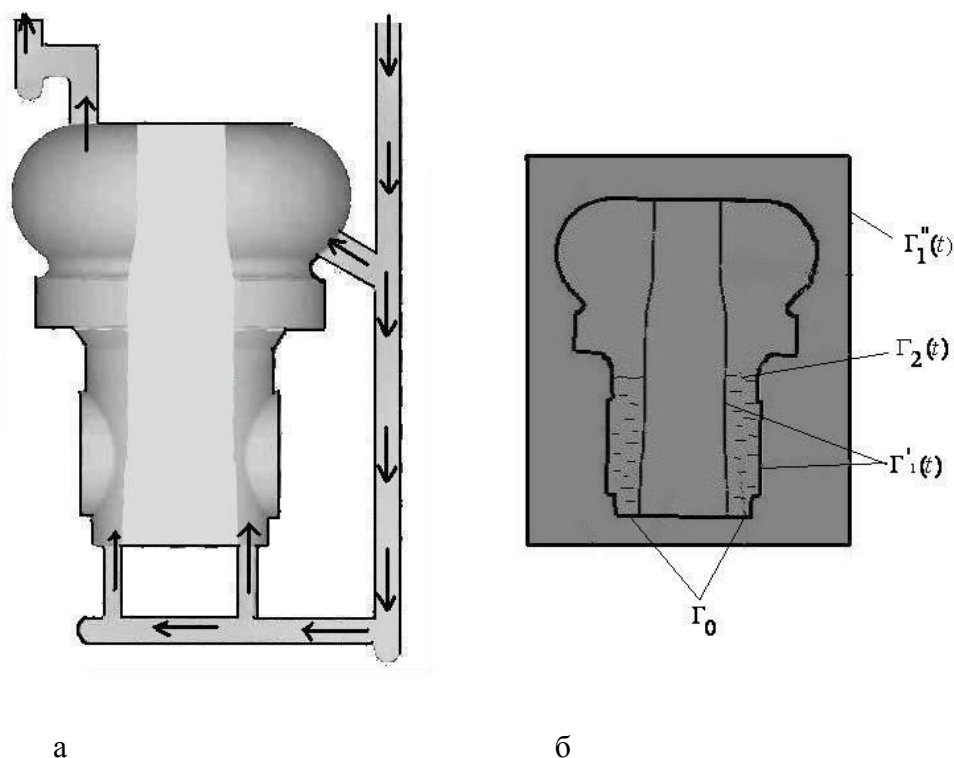


Рис. 1. Форма для заливки превентора; а – схема движения расплава металла по форме, б – схема расчетной области – фронтальный разрез

Для описания процессов теплообмена используется однофазный подход – уравнения сохранения энергии записываются для всей области в целом, содержащей как жидкий расплав, так и затвердевший металл. В этом случае нет необходимости явным образом отслеживать положение границы  $\Gamma_{f_s}(t)$  фазового перехода, ее положение определяется апостериорно по изолиниям температур солидус и ликвидус.

В однофазном подходе предполагается, что существует простое соотношение, устанавливающее функциональную зависимость количества твердой фазы от температуры.

Предположим, что теплота кристаллизации выделяется внутри интервала кристаллизации, ограниченного равновесными значениями температур ликвидуса и солидуса, соответствующими исходному содержанию растворимой примеси в расплаве, а скорость кристаллизации находится из равновесной диаграммы состояния расплава.

Дифференциальное уравнение, описывающее теплообмен в исследуемой области, имеет вид:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla H - \nabla \cdot [\lambda \nabla T] = 0 \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\lambda$  – плотность и коэффициент теплопроводности, в общем случае зависящие от

температуры,  $H = \int_{T_H}^T c_p(T) dT$  – энтальпия,  $c_p(T)$  – удельная теплоемкость, изменение которой в диапазоне  $T_L - T_S$  отражает эффект тепловыделения при кристаллизации,  $\mathbf{U} = f_1 \mathbf{U}_{жидк}$  – вектор скорости в двухфазной области,  $\mathbf{U}_{жидк}$  – вектор скорости жидкой фазы,  $f_1$  – относительное объемное содержание жидкой фазы.

Твердая фаза считается неподвижной, а значит, в конвекции принимает участие только доля объема, занятого жидкостью, при этом под скоростью среды понимается «доля скорости», вносимая жидкой фазой  $f_1 \mathbf{U}_{жидк}$ .

Уравнение (1) описывает перенос тепла в жидкой фазе как за счет конвекции, так и механизмами теплопроводности.

Поля скоростей и давлений в расплаве и двухфазной зоне определяются уравнением движения, которое с учетом несжимаемости потока и закона Дарси, принимает вид:

$$\rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla p - \nabla \cdot ((\mu + \mu_1) \nabla \mathbf{U}) = \rho \mathbf{g} - \frac{\mu}{K} \mathbf{U} \quad (2)$$

где  $p$  – давление,  $\mu$  – сдвиговая вязкость,  $\mu_1$  – турбулентная вязкость.

Для определения проницаемости  $K$  в двухфазной зоне используется соотношение Козени – Кармана [14]:

$$K = \frac{f_l^3}{k_c S_V^2} = \frac{f_l^3}{5M_\delta^2 (1-f_l)^2}$$

где  $S_V = 6\lambda(1-f_l)/D_p$  – удельная поверхность твердой фазы (на единицу объема),  $k_c = 5$  – постоянная Козени – Кармана, которая принимает различные значения в зависимости от характеристик пористой среды,  $M_\delta = 6\lambda/D_p$  – отношение площади поверхности к объему для твердой фазы,  $\lambda$  – параметр формы.

#### Граничные условия

1) Скорость расплава на входе в форму ( $\Gamma_0$ ) подчиняется логарифмическому закону

распределения. На границе перехода от твердо-жидкой к абсолютно твердой фазе  $\Gamma_{f_s}(t)$

скорость  $U$  автоматически становится равной 0, поскольку  $U = f_l U_l$ , а  $f_l = 0$  на  $\Gamma_{f_s}(t)$ .

На внутренних твердых стенках  $\Gamma_1'(t)$  задано условие прилипания  $U = 0$ .

2)  $\hat{\sigma} \cdot n = -p^0 n$  на  $\Gamma_2(t)$  – условие равенства нормальных напряжений давлению газа  $p^0$  над свободной поверхностью. Кривизной свободной поверхности расплава пренебрегаем.

3) Уравнение свободной поверхности расплава имеет вид:

$$F(x_1, x_2, x_3, t) = x_3 - \xi(x_1, x_2, t) = 0$$

тогда 
$$\frac{dF(x_1, x_2, x_3, t)}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + U \cdot \nabla(F) = 0 \quad \text{на } \Gamma_2(t)$$

в эйлеровой форме условие продвижения свободной поверхности во времени и пространстве (используется для нахождения формы свободной поверхности).

4)  $\lambda_\phi \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_{o-\phi} (T_o - T_\phi)$  на  $\Gamma_1'(t)$  – условия стыковки на границе

отливки и формы, где  $n$  – нормаль к поверхности,  $T_o$  – температура отливки,  $T_\phi$  –

температура формы,  $\alpha_{o-\phi}$  – коэффициент теплообмена между отливкой и формой.

$$5) \lambda_o \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_{o-c}(T_o - T_c) - \varepsilon\sigma(T_o^4 - T_c^4) \quad \text{на } \Gamma_2(t) \quad - \text{ условия на свободной}$$

поверхности расплава с учетом лучистого и конвективного теплообмена, где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\varepsilon$  – степень черноты материала отливки,  $\alpha_{o-c}$  – коэффициент теплообмена между расплавом и внутренностью формы,  $T_c$  – температура во внутренней полости формы, не заполненной расплавом.

$$6) \lambda_\phi \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_{\phi-c}(T_\phi - T_c) - \varepsilon\sigma(T_\phi^4 - T_c^4) \quad \text{на } \Gamma_1''(t) \quad - \text{ условие на свободной}$$

поверхности формы и окружающей среды, где  $\alpha_{\phi-c}$  – коэффициент теплообмена.

#### *Начальные условия*

1) Предполагается, что в начальный момент времени свободная поверхность, совпадающая с  $\Gamma_0$ , является плоской и известно начальное распределение скоростей на ней.

2) В начальный момент времени температура расплава  $T = 1575$  °С, температура окружающей среды 20 °С, температура формы 100 °С.

#### **Численная реализация задачи**

Линеаризация и численное решение полученной системы уравнений в полной нестационарной трехмерной постановке выполнено средствами программного кода ProCAST. Конечно-элементная модель включает в себя около 1 181 тысяч элементов.

Изначально было проведено моделирование двух процессов: заливки стали в течение 35 секунд и последующая кристаллизация. Данные процессы рассматривались как единая задача. Далее был проведен расчет только процесса кристаллизации, начальные условия по температуре для которого задавались константами в ProCAST. Проведенный анализ результатов показал, что учет конвекции расплава при заливке не вносит существенных изменений в результаты расчета процесса кристаллизации, поэтому в дальнейшем исследовалось только затвердевание слитка без описания этапа заливки.

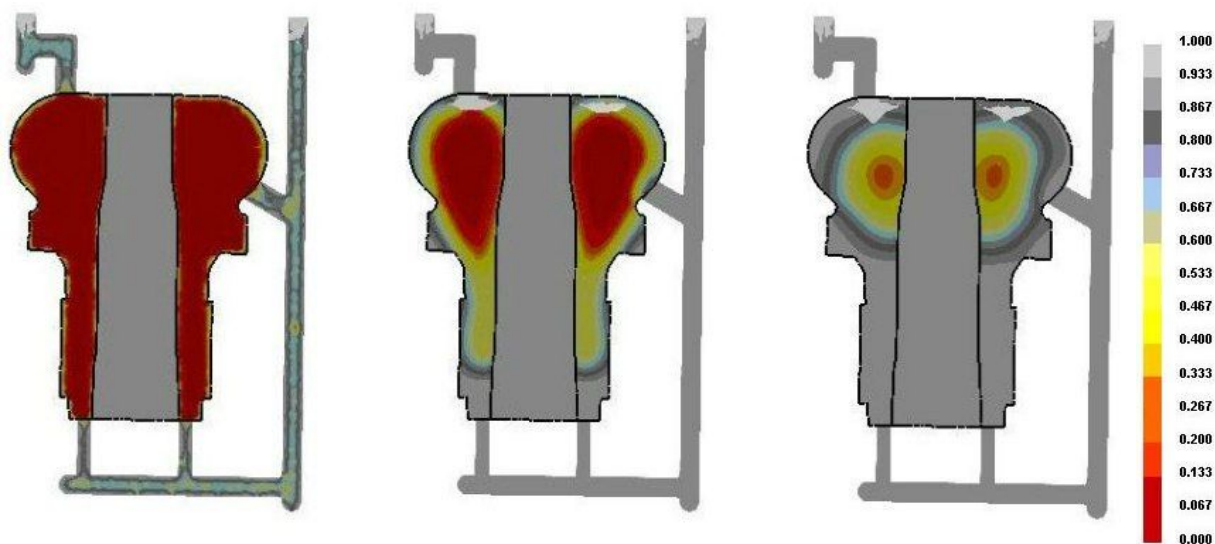


Рис. 2. Кристаллизация преентора из стали марки 42CrMoV:

(а) относительная доля твердого вещества по окончании процесса заливки, (б) – через 27 мин после окончания заливки, (в) - через 95 мин после окончания заливки (0 – жидкий металл, 1 – затвердевший металл)

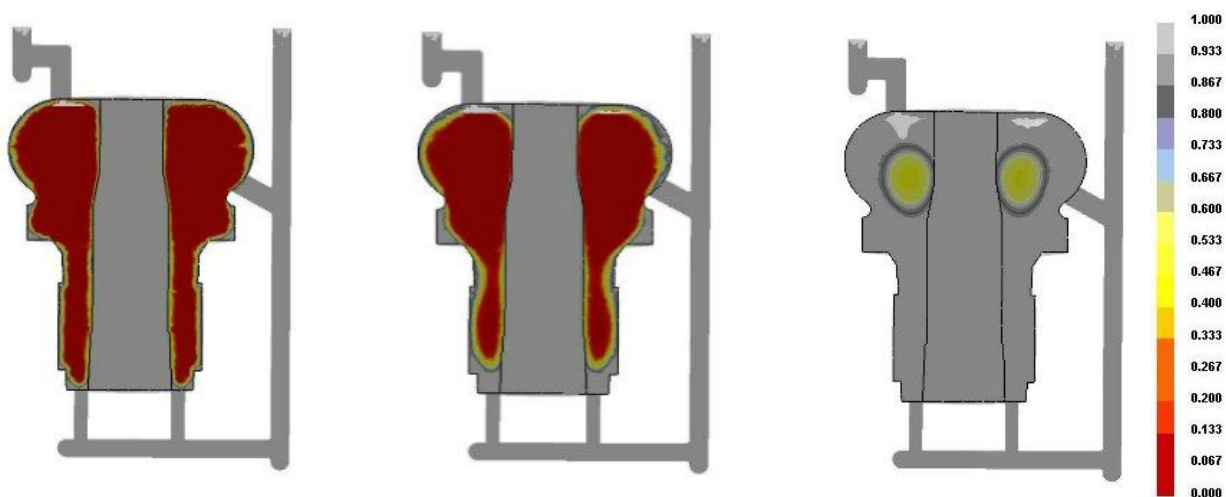


Рис. 3. Кристаллизация преентора из стали марки 30ХМЛ:

(а) относительная доля твердого вещества по окончании процесса заливки, (б) – через 27 мин после окончания заливки, (в) – через 95 мин. после окончания заливки (0 – жидкий металл, 1 – затвердевший металл)

Был выполнен анализ процесса для двух марок стали. В первом случае исследован процесс кристаллизации стали марки 42CrMoV, материал формы – специальная песчано-смоляная смесь alfaset. Начальные температурные поля заданы постоянными. Заливка проводилась 35 секунд. В ходе данного моделирования были получены картины затвердевания (рис. 2), позволяющие оценить время кристаллизации изделия.

Во втором случае исследован процесс кристаллизации стали марки 30ХМЛ, материал формы и параметры процесса аналогичны первому случаю. Также были получены картины

доли затвердевшего металла (рис. 3).

Проведено сравнение картин пористости в готовом изделии, изготовленном в ходе натурального эксперимента, и результатов, полученных в ходе численного эксперимента (рис. 4). Сравнение показало, что существенных различий в картинах нет, результаты численного эксперимента удовлетворительно соответствуют натурным данным.

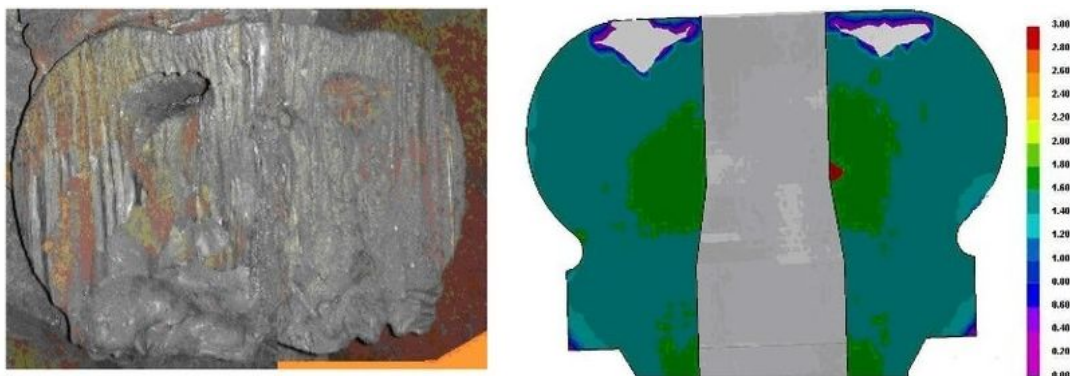


Рис. 4. Сравнение картин пористости

### **Заключение**

Таким образом, на основе численного моделирования изучена эволюция температурных полей в процессе кристаллизации слитка при изготовлении литой заготовки превентора. Дан прогноз времени полной кристаллизации изделия, установлены места локализации возможных литьевых дефектов в виде пор. Картина распределения пористости подтверждена экспериментально на препарированном образце литой заготовки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).*

### **Список литературы**

1. Бройтман О.А., Монастырский А.В., Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Макарычева Е.В., Сараев Д.Ю. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков // Литейщик России. 2011. № 10. С. 7–15.
2. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 768 с.
3. Голубцов В. А., Лунев В. В. Модифицирование стальных слитков и отливок // Литейное производство. – 2010. – № 2. – С. 10-13.
4. Гусева Т.А., Кершенбаум В.Я. Оценка влияния технологических параметров противовыбросового оборудования на уровень риска отказа, приводящего к фонтану // Оборудование и технологии для

нефтегазового комплекса. – 2012. – № 5. – С. 6-9.

5. Мелихов В.М. Разработка рациональных параметров теплопереноса и гидродинамики при формировании слитков. // Вісник Донецького національного університету, сер. А, вип. 2: Природничі науки, 2010, 124-134.
6. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Ленинград: Недра, 1985. – 240 с.
7. Соколова О.О., Сметанников О.Ю. Численное моделирование затвердевания и структуры металлического слитка // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 1. – С. 152-167.
8. Цаплин А.И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1995. – 238 с.
9. Balcar M., Zelezny R., Sochor L., Fila P., Martinek L. The development of a chill mould for tool steels using numerical modeling. // Mater Technol, Vol4, pp.76-82, 2008.
10. Combeau H., Kumar A., Zaloznik M. Modeling of equiaxed grain evolution and macrosegregations development in steel ingots. // Trans IIM, Vol 62, pp. 285-290, 2009.
11. Combeau H., Zaloznik M., Hans P., Richy P.-E. Prediction of macrosegregation in steel ingots: influence of the motion and the morphology of equiaxed grains. // Metal Mater Trans B, Vol 40, pp. 289-304, 2009.
12. Kermanpur A., Eskandari M., Purmohamad H., Soltani M.A., Shateri R. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. // Materials and Design, 31, pp. 1096-1104, 2010.
13. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. // Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp 269-289, 1974.
14. ProCAST 2010 User's Manual ©2010 ESI Group.

**Рецензенты:** Столбов В.Ю., д.т.н., профессор кафедры математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.

Шардаков И.Н., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией Института механики сплошных сред Уральского отделения Академии наук, г. Пермь.