



Одинокое В. И., Дмитриев Э. А., Евстигнеев А. И., Свиридов А. В., Севастьянов Г. М.

V. I. Odinokov, E. A. Dmitriev, A. I. Evstigneev, A. V. Sviridov, G. M. Sevastianov

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПРИ ЛИТЬЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

MATHEMATICAL MODELING OF THE MULTILAYER SHELL MOLD THERMAL STRESS STATE WITH PHASE TRANSITION WHEN STEEL CASTING

Одинокое Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-912-271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Mr. Valeriy I. Odinokov – Doctor of Engineering, Professor, Visiting Professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-912-271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, доцент, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)53-23-04. E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Eduard A. Dmitriev – Doctor of Engineering, Associate Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8(4217)53-23-04. E-mail: rector@knastu.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-914-175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Evstigneev – Doctor of Engineering, Professor, University Administration Adviser, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-914-175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-909-829-58-55. E-mail: andrey1979_2009@mail.ru.

Mr. Andrei V. Sviridov – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanic Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-909-829-58-55. E-mail: andrey1979_2009@mail.ru.

Севастьянов Георгий Мамиевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности ученого секретаря Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-914-210-45-28. E-mail: akela.86@mail.ru.

Mr. Georgiy M. Sevastyanov – PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of machinery and metallurgy, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-914-210-45-28. E-mail: akela.86@mail.ru.

Аннотация. Рассматривается механизм влияния температурного перепада между слоями литейной формы на трещиностойкость оболочек. Исследуются факторы, оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние литейных оболочковых форм.

Summary. The mechanism of the influence of the temperature difference between the mold layers on the crack resistance of the shells is considered. Factors affecting the stress-strain state of cast shell molds are investigated.

Ключевые слова: многослойные формы, литье по выплавляемым моделям, структура формы, математическое моделирование.

Key words: multi-layer form, the casting, the mold structure, mathematical modeling.

УДК 621.74:001.891.573

Анализ тенденций развития технологических процессов формообразования литейных оболочковых форм (ОФ) показывает, что точность и чистота поверхности отливок являются одними из главных критериев уровня развития науки и технологии литейного производства. Высокие показатели по этим признакам обеспечивают неразъемные высокоогнеупорные негасящиеся ОФ по выплавляемым моделям (ВМ), материалы которых не взаимодействуют с заливаемыми сплавами. Одним из новых направлений повышения качества технологических и эксплуатационных свойств ОФ по ВМ является структурно-деформационный подход к управлению морфологическим строением и свойствами ОФ на основе их иерархии структур как отдельных элементов, отдельного слоя или группы слоев, а также оболочки в целом [1].

Трещиностойкость ОФ по ВМ зависит главным образом от их напряженно-деформированного состояния (НДС) на различных этапах формообразования. Известные методы снижения [2 – 5] НДС ОФ остаются малоизученными, так как нет четких сведений о параметрах различных структур ОФ и эффективности их влияния на изменение свойств последних. Таким образом, актуальным направлением исследования являются определение НДС на каждом этапе формообразования ОФ и разработка путей его снижения.

Поиск и выбор путей повышения трещиностойкости как многослойных, так и однослойных ОФ (форетических) за счет снижения НДС возможен на базе комплексного изучения закономерностей формирования структуры и свойств оболочек в процессе их формообразования, прокаливания, заливки расплавом и кристаллизации отливок, а также теоретического прогнозирования возможного образования трещин в оболочке за счет математического моделирования процессов формообразования и применения оболочек [6].

В работе исследовали НДС многослойных ОФ (плоская задача), осесимметричных многослойных ОФ (объемная задача) и однослойных ОФ (объемная задача) при их заливке и кристаллизации металла (см. рис. 1).

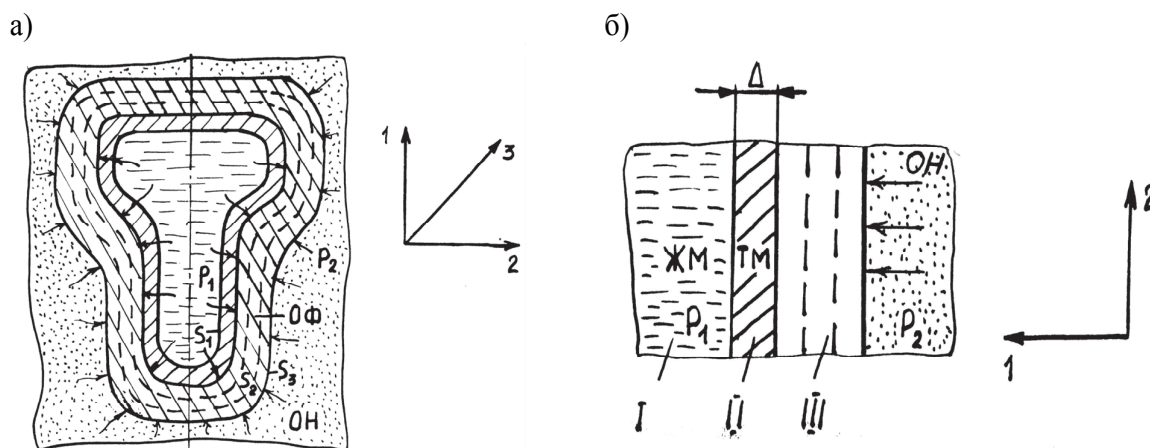


Рис. 1. Расчетная схема процесса заливки и кристаллизации отливки в ОФ:

а – сечение отливки и ОФ в горизонтальной плоскости; б – схема моделирования областей системы; ЖМ, ТМ – жидкий и твердый металл соответственно; ОН – опорный наполнитель; P_1 – ферростатическое давление жидкого металла; P_2 – гидростатическое давление со стороны опорного наполнителя; $S_1 – S_3$ – поверхности исследуемой области

На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения теплопроводности была построена математическая модель процесса затвердевания металла после его заливки в многослойную оболочковую форму.

Реализация предложенной системы уравнений осуществляется численным методом, разработанным профессором В. И. Одиноким [1]. Суть метода состоит в разбиении исследуемой об-

ласти на криволинейные элементы ортогональной формы, составлении исходной системы дифференциальных уравнений по элементу в разностном виде через значения напряжений и перемещений (скоростей перемещений) по граням элемента, численного решения построенной алгебраической системы уравнений с учетом начальных и граничных условий по разработанной программе [2]. Для решения уравнения теплопроводности использовали разностную схему и алгоритм решения, описанный в работе [1].

Предполагалось, что температура в твердой фазе изменялась по линейному закону, а градиент температуры в жидкой фазе равен нулю.

В Эйлеровой системе координат рассматриваемый процесс описали следующей системой уравнений:

$$y_{ij,j} = 0, \quad \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^x, \quad \varepsilon_{ij}^x = \varepsilon_{ij} - (1/3)\varepsilon \delta_{ij},$$

$$\varepsilon = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta_n - \theta_p); \quad \varepsilon = \varepsilon_{ii},$$

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad \frac{d\theta}{d\tau} = a_p \Delta \theta; \quad i = 1, 2.$$

Здесь σ_{ij} – напряжения; ε_{ij} – деформации (малые); G_p – модуль сдвига в p -й оболочке; u_i – перемещения; θ – температура; a_p – коэффициент теплопроводности; k_p – коэффициент объемного сжатия; δ_{ij} – символ Кронекера. В уравнении имеет место суммирование по повторяющимся индексам i, j ; θ_p – начальная температура в p -й оболочке; θ_n – текущая температура; α_p – коэффициент линейного расширения в области p ; τ – время.

На каждом временном шаге $\Delta\tau_n$ вычисляется толщина затвердевшей корочки металла.

Начальные условия задачи:

$\Delta|_{t=0} = 0$ – отсутствие твердой фазы металла;

$\theta_1^*|_{t=0} = 0$ – температура заливаемого жидкого металла;

$\theta_3^*|_{t=0} = \theta^*$ – начальная температура формы;

θ_H – температура опорного наполнителя;

θ_2^* – температура кристаллизации металла.

Граничные условия задачи:

Плоскости симметрии $U_2 = 0, \quad \sigma_{21} = 0, \quad q_{\Pi} = 0.$

На поверхностях S_1, S_3

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -P; \quad \sigma_{12}|_{S_1} = 0; \quad \sigma_{11}|_{S_3} = -P_2;$$

$$\sigma_{12}|_{S_3} = -\Psi \frac{V_{ck}}{V^*} \cos(n_1 x_1); \quad q_{\Pi}|_{S_3} = \alpha^* (\theta_H - \theta_2),$$

где V_{ck} – скорость скольжения материала формы относительно опорного наполнителя; V^* – нормирующая скорость; Ψ – параметр, характеризующий условия трения между формой и опорным наполнителем; $q_{\Pi}|_{S_3}$ – плотность теплового потока по нормали к поверхности S_3 ; α^* – коэффициент теплообмена между ОФ и опорным наполнителем.

В целом результаты моделирования показывают, что наибольшие перепады температур возникают между первым и вторым слоями ОФ, а максимальные значения напряжений и деформаций наблюдаются в первом слое формы.

Было установлено, что интервал времени на характер распределения температур влияния не оказывает. В первом слое ОФ наблюдается рост температуры в течение первых 10 с, во втором слое – 40 с, в третьем слое – 50 с с момента заполнения ОФ расплавом, после которого температу-

ра равномерно уменьшается. На четвертом и пятом слоях увеличение температуры наблюдается до окончания расчетов.

При разработке математической модели процесса затвердевания металла отливки после его заливки в однослойную (электрофоретическую) оболочковую форму (ОФ) использовали ту же систему дифференциальных уравнений, только в осесимметричном виде.

Учитывалось, что моделируемая система на начальном этапе является двухкомпонентной: жидкий металл – форма. С течением времени за счет изменения температурных полей система переходит в трехкомпонентную: жидкий металл I (ЖМ) – твердый металл II (ТМ) – форма III (см. рис. 2).

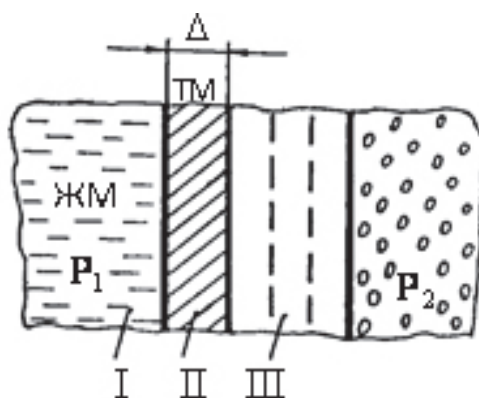


Рис. 2. Схема расположения областей системы:
 I – жидкий металл; II – затвердевший металл; III – форма;
 P_1 и P_2 – силы давления на ОФ со стороны металла
 и опорного наполнителя соответственно

Рассматривали осесимметричное тело вращения. Движение считали медленным. В трехкомпонентной системе деформируемая среда – затвердевший металл (область II) и форма (область III) – изотропные материалы. Процесс – нестационарный.

В итоге был получен общий алгоритм моделирования НДС монослойных электрофоретических форм:

1) Время охлаждения τ^* разбивается на конечное число шагов $\tau^* = \sum \Delta\tau_n$, где n – номер временного шага.

2) Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов.

3) Задаются начальные и граничные условия по элементам, образующим рассматриваемую область, и константы физико-механических свойств материалов.

4) Вычисляются длины дуг элементов.

5) Определяется поле температур на временном шаге $\Delta\tau_n$ численным решением уравнения теплопроводности при наличии начальных и граничных условий на данном временном шаге.

6) Если температура в области (I) у поверхности S_2 $\theta|_{S_2} \leq \theta_{II}^*$, то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки Δ_n . Если $\theta|_{S_2} > \theta_{II}^*$, то выполняется операция п. 7.

7) С учетом разностных аналогов и разработанной методики, описанной в работе [1], определяются поля напряжений σ_{ij} и перемещений U_i ($i, j = 1, 2$).

8) Производится шаг времени. Если $\sum \Delta\tau_n < \tau^*$, то выполняется операция п. 4. Если $\sum \Delta\tau_n = \tau^*$, то процесс вычисления закончен [1; 2].

Выводы

На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения теплопроводности при использовании численного метода построена математическая модель НДС многослойной и электрофоре-

тической оболочковой формы, позволяющая рассчитывать температурные поля в форме и затвердевающей отливке, толщину затвердевшего слоя отливки, напряжения, деформации и перемещения слоев оболочки относительно друг друга, а также ферростатическое давление металла на форму.

Результаты расчетов показывают, что при заливке металла наибольшие перепады температур возникают между первым и вторым слоями формы, а максимальные значения напряжений и деформаций характерны для первого слоя формы.

Установлен механизм влияния температурного перепада между слоями ОФ на трещиностойкость оболочек и его критическая величина, при достижении которой происходит либо расслоение оболочки, либо образование сквозных трещин, приводящих к разрушению формы.

Процесс прокаливания ОФ в опорном наполнителе не оказывает существенного влияния на образование трещин, поскольку перепад температур между слоями оболочки не достигает критического значения.

В результате анализа расчетных данных установлено, что на НДС электрофоретических ОФ во время проковки большое влияние оказывает скорость нагрева ОФ и, как следствие, перепад температур по толщине формы. Установлено, что наибольшая вероятность образования трещин в электрофоретических формах возникает в средних слоях холодных форм, заливаемых жидким металлом за счет высоких напряжений, вызванных фазовым расширением кварца при температуре около 600 °С [7 – 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. А. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
2. Евстигнеев, А. И. Решение проблем формообразования в литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 40-43.
3. Специальные технологии литейного производства: учеб. пособие. Ч. 2 / под общ. ред. А. И. Евстигнеева, Е. А. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2012. – 436 с.
4. Свиридов, А. В. Изготовление оболочковых литейных форм с использованием электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 61-66.
5. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
6. Пат. 2481917 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Суспензия для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142658/02; заявл. 19.12.11; опубл. 20.05.13. Бюл. № 15. – 2 с.
7. Пат. 2488458 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Способ изготовления выплавляемых моделей для получения оболочковых форм методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 13. – 3 с.
8. Пат. 115260 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Устройство для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142759/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 10. – 3 с.
9. Совершенствование технологии формообразования электрофоретических оболочек / А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов, Э. А. Дмитриев, В. В. Петров // Литейное производство. – 2014. – № 9. – С. 32-34.