

УДК 669:004.94

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КОРРЕКТИРОВКА БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© О. М. Огородникова¹, С. В. Мартыненко²

Статья поступила 5 ноября 2014 г.

Проведены натурные эксперименты по кристаллизации тестовой отливки из стали 20ГЛ, применяемой для изготовления литых деталей тележек грузовых вагонов. Результаты измерения температуры термопарами, установленными в литейной форме, использованы для решения обратной задачи восстановления теплофизических характеристик материалов формы в уравнении теплопроводности. Предложенный расчетно-экспериментальный метод восстановления свойств может быть использован для пополнения баз данных материалов специализированных программ САЕ (Computer Aided Engineering), выполняющих моделирование литейных технологий. Суть метода заключается в проведении серии вычислительных экспериментов, идентичных натурному; при этом достигается приближение расчетных температурных кривых к натурным показаниям термопар за счет направленного изменения динамических переменных. Для направленного изменения переменных применен метод многопараметрической оптимизации Левенберга – Марквардта.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; САЕ; литейные технологии; базы данных материалов; метод Левенберга – Марквардта.

Компьютерное моделирование литейных технологий становится неотъемлемой частью проектирования и производства заготовок деталей машин [1]. В заводской практике используются как российские, так и зарубежные программы компьютерного инженерного анализа САЕ (Computer Aided Engineering) [2]. Симуляция технологических процессов в САЕ позволяет на ранних стадиях предпроизводственной подготовки выявить возможные дефекты и своевременно внести коррективы в цифровые модели проектируемых изделий с минимальными затратами ресурсов и времени [3].

Точность компьютерных прогнозов ожидаемой дефектности отливок во многом определяется надежностью входных данных [4]. Базовая вычислительная процедура в анализе литейных технологий — решение на сетке уравнения теплопроводности, коэффициенты которого отражают теплофизические свойства материалов [5] и являются обязательной входной информацией при компьютерном моделировании температурных полей. Необходимые для расчета температурных полей характеристики (теплопроводность, теплоемкость, плотность материалов) сами по себе являются функциями температуры и предопределяют нелинейность решаемого дифференциального уравнения. Вычисленное на первом этапе компьютерного моделирования нестационарное температурное поле передается в рамках связанного анализа в программные модули, которые выявляют расположение и величину литейных дефектов, включая трещины [6].

Проблема, с которой мы столкнулись при внедрении программ WinCAST и LVMFlow в конструкторском бюро литейной оснастки НПК «Уралвагонзвод», заключается в отсутствии информации о необходимых свойствах материалов [7]. Поставляемые с программами базы данных материалов ограничены — они включают не более сотни позиций и не могут содержать сведений о сплавах, химический состав которых назначается по техническим условиям предприятия. Что касается литейных сплавов и сталей, то их теплофизические свойства теоретически можно восстановить по процентному содержанию легирующих элементов [8]. Проблематичнее дело обстоит с материалами форм, стержней и покрытий. Свойства и составы вспомогательных материалов для различных литейных производств и цехов индивидуальны. Более того, зачастую наиболее актуальные значения всех динамических переменных вблизи солидуса кристаллизующегося металла измерить в эксперименте не представляется возможным [9]. Тогда встает вопрос о расчетной корректировке баз данных для компьютерного моделирования литейных технологий с непосредственной привязкой к производственным условиям конкретного литейного цеха. Разработка расчетно-экспериментальных методов такой корректировки в заводских условиях — цель данной работы.

Натурные эксперименты. Натурные эксперименты проведены в цеховых условиях НПК «Уралвагонзвод» для углеродистой стали 20ГЛ, из которой изготавливают литые детали тележек грузовых вагонов — «Рама боковая» и «Балка надпрессорная» [10]. В эксперименте методом гравитационного литья изготовлена тестовая отливка. Литейная форма (рис. 1) собрана из

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: o.m.ogorodnikova@bk.ru

² НПК «Уралвагонзвод», г. Нижний Тагил, Россия.

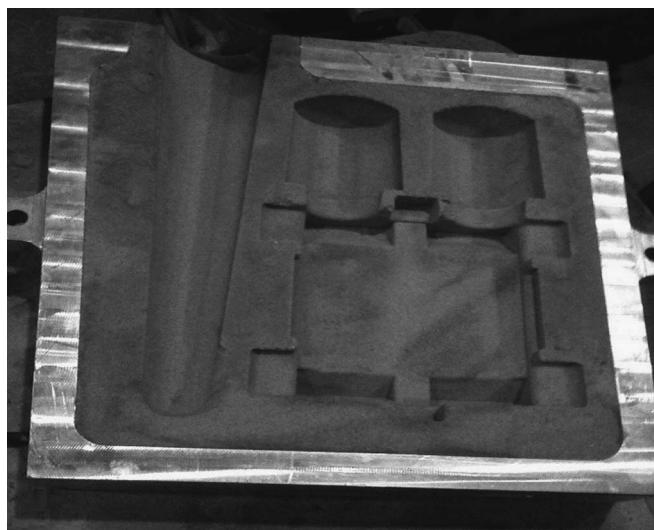


Рис. 1. Двухслойная полуформа для изготовления тестовой отливки

двух слоев: внутреннего, изготовленного из формовочной смеси на основе песка и смолы, и внешнего — из металлического сплава.

Показания четырех термопар, установленных в форме (рис. 2), с регистрационным шагом 6 с представлены на рис. 3 температурными кривыми.

Показания термопар подвергнуты аналитической обработке и аппроксимированы зависимостями вида

$$\begin{aligned} T(t) = & T_0 + \left[A_1 \left(1 - B_1 e^{-\frac{t-t_{01}}{\tau_1}} \right) + A_2 \left(1 - B_2 e^{-\frac{t-t_{02}}{\tau_2}} \right) \right] e^{-\frac{t}{\tau_3}} = \\ & = T_0 + [f_1(t) + f_2(t)]f_3(t), \end{aligned}$$

где начальная температура литейной формы (T_0) равна температуре окружающей среды (23°C). Найденные коэффициенты экспоненциальных функций $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ приведены в таблице.

Аппроксимирующая функция учитывает, что на показания термопар оказывают влияние конкурирующие процессы: нагрев в результате теплопередачи от кристаллизующейся и остывающей отливки, а также охлаждение в результате теплоотдачи через внешнюю поверхность литейной формы. Эти процессы имитированы в аппроксимирующей зависимости функциями $f_1(t) + f_2(t)$ и $f_3(t)$ соответственно. Весь период нагрева изложницы можно формально разделить на два временных интервала. Функция $f_1(t)$ описывает временной интервал передачи теплоты от кристаллизующейся отливки в форму, функция $f_2(t)$ — временной интервал передачи теплоты от остывающей отливки после кристаллизации. Коэффициенты t_{01} и t_{02} характеризуют продолжительность направленного действия тепловых источников; в соответствии с показаниями термопар время кристаллизации стали $t_{01} \approx 840 - 890$ с. Функции $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ характеризуют изменение температурного поля в литейной форме и

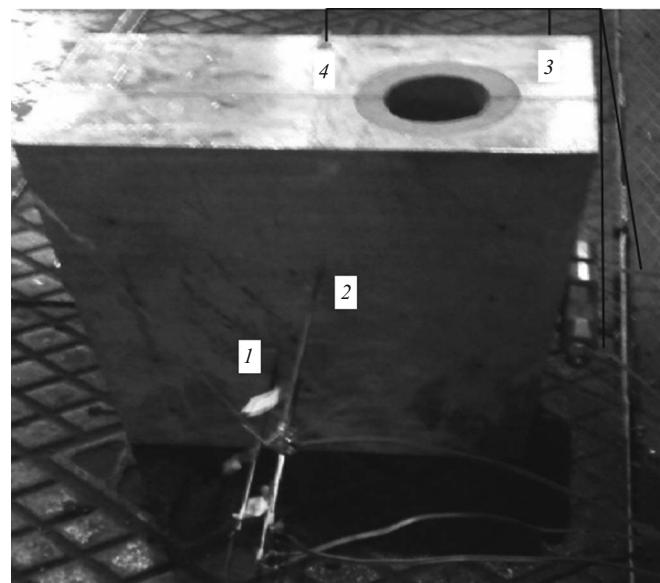


Рис. 2. Расположение точек (1 – 4) измерения термопарами температурного поля в форме при кристаллизации стали 20ГЛ и охлаждении тестовой отливки

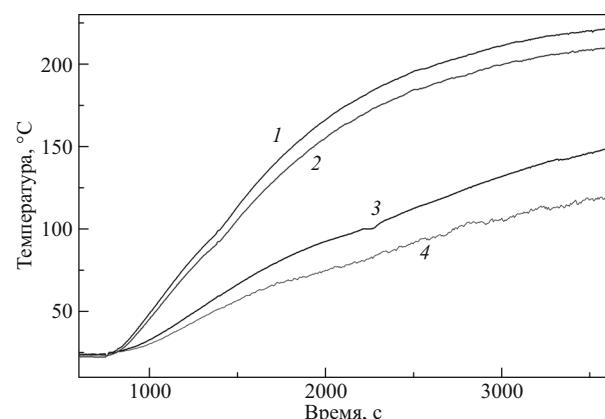


Рис. 3. Температурные кривые по показаниям термопар (1 – 4) после заливки расплава в форму

носят экспоненциальный характер, поскольку аналитически или приближенно находятся решением уравнения теплопроводности:

$$\nabla k(T) \nabla T = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t},$$

где $T = T(t, x, y, z)$ — изменение температуры с течением времени t в точке пространства с координатами x, y, z ; $\rho(T)$ — плотность; $c(T)$ — теплоемкость; $k(T)$ — теплопроводность (материалов формы).

Компьютерные эксперименты. Компьютерные эксперименты по моделированию литейной технологии в соответствии с натурным экспериментом проведены в программе LVMFlow (разработчик — МКМ, г. Ижевск). Программа дискретными методами решает уравнение теплопроводности вместе с граничными

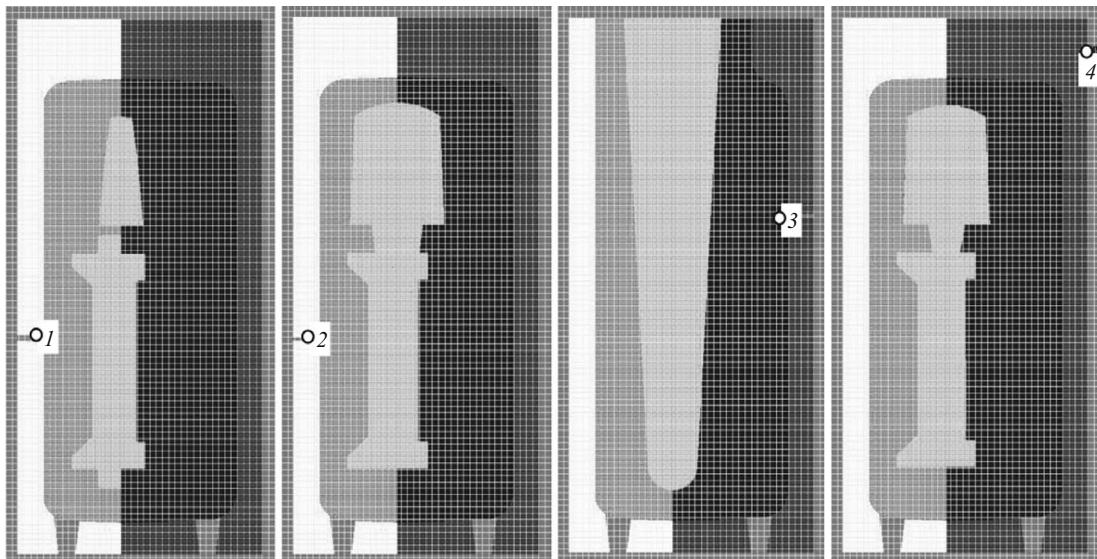


Рис. 4. Расположение виртуальных датчиков температуры в компьютерной модели

условиями на трехмерной расчетной сетке; уравнение в общем случае имеет вид:

$$\nabla k(T) \nabla T + \dot{q}(T) = p(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t},$$

где $\dot{q}(T)$ — реализация скрытой теплоты фазового превращения (кристаллизации). Коэффициенты решаемого уравнения — динамические переменные (плотность, теплоемкость, теплопроводность, теплота плавления), которые задаются как исходные данные для расчета в виде температурных зависимостей. Определяющее уравнение является нелинейным и требует на каждом расчетном шаге корреляции динамических переменных в соответствии с исходными данными о температурной зависимости теплофизических свойств.

Геометрическая модель отливки, литниково-питающей системы и формы транслированы на расчет из 3D CAD в триангулированном формате STL. Согласно программной оценке процессов затвердевания, сталь полностью кристаллизуется в течение приблизительно 850 с после заливки в форму. Полученный в программе LVMFlow расчетный результат хорошо коррелирует с соответствующим параметром экспонен-

циальной аппроксимации экспериментальных зависимостей температуры от времени (см. таблицу).

В компьютерной модели заданы виртуальные датчики температуры, координаты которых соответствуют расположению термопар в натурном эксперименте (рис. 4).

В серии имитаций натурного эксперимента достигнуто приближение расчетных температурных кривых к соответствующим показаниям термопар. В качестве исходных свойств материалов формы приняты имеющиеся в базе данных LVMFlow температурные зависимости теплопроводности, теплоемкости и плотности для холоднотвердеющей смеси (фуран-процесс) и конструкционной углеродистой стали 35ГЛ. Критерий качества, отражающий близость расчетных T_i и экспериментальных $T(t_i)$ температурных кривых, $K = \frac{\sum |T(t_i) - T_i|}{\sum T_i}$ в исходном компьютерном

эксперименте показал большое расхождение вычисленных и измеренных значений температуры — K варьируется от 25 до 40 % для всех термопар. При такой ошибке в вычислении температурных полей можно сомневаться в точности последующей оценки ожидаемых литьевых дефектов, которая базируется на вычисленном распределении и изменении температуры.

Для направленного изменения теплофизических свойств материалов формы использован метод многопараметрической оптимизации Левенберга — Марквардта. Исходные и коррелированные зависимости теплофизических свойств от температуры приведены на рис. 5.

Критерий качества для используемых в компьютерном вычислении температурных полей теплофизических свойств снижен до значений менее 10 %. Дальнейшее сближение расчетных кривых изменения температуры и экспериментальных показаний термопар

Коэффициенты зависимостей, аппроксимирующих экспериментальные температурные кривые

	Термопара 1	Термопара 2	Термопара 3	Термопара 4
$A_1, ^\circ\text{C}$	180	192	196	153
$A_2, ^\circ\text{C}$	159	128	59	30
B_1	0,999	0,997	0,998	0,999
B_2	0,999	0,997	0,99	0,995
$\tau_1, \text{с}$	919	1082	2202	2208
$\tau_2, \text{с}$	2253	2226	3352	1443
$\tau_3, \text{с}$	11206	11084	16468	13145
$t_{01}, \text{с}$	841	846	888	883
$t_{02}, \text{с}$	1338	1369	2420	2352

мы связываем с эффектами, которые не можем варировать в интерфейсе LVMFlow (зазор между формой и отливкой, который появляется на начальном этапе и на короткий период изменяет контактное тепловое сопротивление, а также тепловое сопротивление защитного колпачка термопары).

Таким образом, проведены натурные и компьютерные эксперименты по моделированию температурных полей при затвердевании и охлаждении тестовой отливки в двухслойной форме. Разработана методика восстановления и уточнения свойств формовочных смесей, позволяющая дополнять базу данных вспомогательных материалов для компьютерного моделирования литейных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородникова О. М., Мартыненко С. В. Связанный анализ технологических процессов и нагруженных состояний литой детали / Металлы. 2012. № 5. С. 19 – 21.
2. Огородникова О. М. Исследовательская функция программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM / Вестник машиностроения. 2012. № 1. С. 25 – 31.
3. Огородникова О. М. Компьютерная диагностика дефектов и механических напряжений в литьих деталях / Дефектоскопия. 2011. Т. 47. № 8. С. 85 – 94.
4. Огородникова О. М. О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение / Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 2(154). С. 30 – 34.
5. Огородникова О. М. Вычислительные методы в компьютерном инжиниринге. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 130 с.
6. Огородникова О. М., Мартыненко С. В., Грузман В. М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках / Литейное производство. 2008. № 10. С. 29 – 34.
7. Огородникова О. М., Пигина Е. В., Мартыненко С. В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литьих деталях / Литейное производство. 2007. № 2. С. 27 – 30.
8. Коновалов А. В., Куркин А. С. Расчетное определение температурных зависимостей теплофизических свойств структурных составляющих низколегированной стали по ее химическому составу / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 9. С. 41 – 45.
9. Огородникова О. М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации / Литейное производство. 2012. № 9. С. 21 – 23.
10. Мартыненко С. В., Огородникова О. М., Грузман В. М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок / Литейное производство. 2009. № 11. С. 21 – 26.

REFERENCES

1. Ogorodnikova O. M., Martynenko S. V. Svyazannyi analiz tekhnologicheskikh protsessov i nagruzhennykh sostoyanii litoi detalii [Combined analysis of technological processes and load conditions of casting] / Metally. 2012. N 5. P. 754 – 756 [in Russian].
2. Ogorodnikova O. M. Issledovatel'skaya funktsiya programm CAE v skvoznykh tekhnologiyakh CAD/CAE/CAM [Scientific research application of CAE software in CAD/CAE/CAM technologies] / Vestnik Mashinostr. 2012. N 1. P. 25 – 31 [in Russian].
3. Ogorodnikova O. M. Komp'yuternaya diagnostika defektov i mehanicheskikh napryazhenii v litykh detalyakh [Simulation of defects and stresses in castings] / Defektoskopiya. 2011. Vol. 47. N 8. P. 85 – 94 [in Russian].
4. Ogorodnikova O. M. O problemakh integratsii vychislitel'nogo materialovedeniya v tsifrovoe mashinostroenie [About problems of integrating the computational materials science into digital engineering] / Inf. Tekhnol. Proekt. Proizv. 2014. N 2(154). P. 30 – 34 [in Russian].
5. Ogorodnikova O. M. Vychislitel'nye metody v komp'yuternom inzhiniringe [Numerical methods in computer-aided engineering]. — Yekaterinburg: Izd. UrFU, 2013. — 130 p. [in Russian].
6. Ogorodnikova O. M., Martynenko S. V., Gruzman V. M. Prognozirovaniye kristallizatsionnykh treshchin v stal'nykh otlivkakh [Prediction of crystallization cracks in steel castings] / Liteinoye Proizv. 2008. N 10. P. 29 – 34 [in Russian].
7. Ogorodnikova O. M., Pigina E. V., Martynenko S. V. Kom'pyuternoe modelirovanie goryachikh treshchin v litykh detal'yakh [Simulation of hot cracks in cast components] / Liteinoye Proizv. 2007. N 2. P. 27 – 30 [in Russian].
8. Konovalov A. V., Kurkin A. P. Raschetnoe opredelenie temperaturnykh zavisimostei teplofizicheskikh svoistv strukturnykh sostavlyayushchikh nizkolegirovannoi stali po ee khimicheskому sostavu [Theoretical determination of the thermal properties of the phase components in steel from data on steel chemical composition] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 9. P. 41 – 45 [in Russian].
9. Ogorodnikova O. M. Napryazhennno-deformirovannoe sostoyanie metalla v effektivnom intervale kristallizatsii [Stress-strain state of metal in the effective range of crystallization] / Liteinoye Proizv. 2012. N 9. P. 21 – 23 [in Russian].
10. Martynenko S. V., Ogorodnikova O. M., Gruzman V. M. Ispol'zovanie komp'yuternykh metodov dlya povysheniya kachestva krupnogabarnitnykh tonkostennykh stal'nykh otливok [Application of computer methods to enhance the quality of large dimension thick-walled steel castings] / Liteinoye Proizv. 2009. N 11. P. 21 – 26 [in Russian].

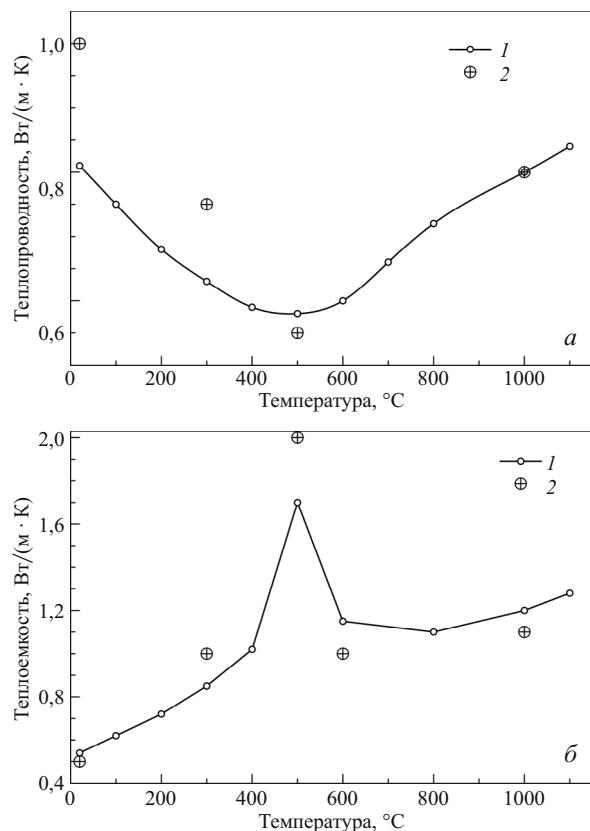


Рис. 5. Коррелированные (1) и исходные (2) зависимости теплопроводности (а) и теплоемкости (б) материала литьей формы