

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-1-42-49>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕШЕНИЕМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

© **Виктория Васильевна Петухова, Ольга Михайловна Огородникова***

Уральский федеральный университет, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19;

*e-mail: Olga.Ogorodnikova@UrFU.ru

*Статья поступила 7 июля 2023 г. Поступила после доработки 8 сентября 2023 г.
Принята к публикации 24 октября 2023 г.*

Теплофизические свойства формовочных материалов литейного производства обусловлены изменением связующих веществ в их составе при тепловом воздействии на технологическую оснастку, изготовленную из смесей на основе песка. В работе представлены результаты разработки алгоритма моделирования теплофизических свойств песчаных формовочных смесей, применяемых в литейной оснастке. При моделировании использовали решение обратной задачи теплопроводности методом Левенберга – Марквардта, предполагающим обращение в итерациях к результатам решения прямой задачи по вычислению нестационарного температурного поля. Прямую задачу нелинейной теплопроводности при затвердевании отливки в песчаной форме решали с помощью программы LVMFlow. Данные о температурном поле при затвердевании отливки из сплава АК7 в песчаной форме получали с использованием термопар. Выполнена оценка точности измерений температуры термодарами применительно к технологическим процессам литья в песчаную форму в зависимости от размеров отливки и температуры плавления литейного сплава. Для экспериментального определения температурных полей в отливках из алюминиевого сплава рекомендованы термодары с хромель-константановыми электродами. Предложен алгоритм для обработки температурных полей, измеренных термодарами в эксперименте по затвердеванию отливки в песчаной форме, и расчетных, полученных при моделировании идентичного литейного процесса в программе LVMFlow. Разработанный алгоритм, реализованный в программной среде SciLab, обеспечивает корректное построение матрицы Якоби. Полученные результаты могут быть использованы при компьютерном моделировании технологии литья с учетом теплофизических свойств материалов формы, что сокращает сроки разработки технологических процессов и оснастки.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; литейные технологии; формовочные материалы; теплофизические свойства; обратная задача теплопроводности.

MODELING OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MOLDING MATERIALS BY SOLVING THE INVERSE HEAT CONDUCTIVITY PROBLEM

© **Viktoriya V. Petukhova, Olga M. Ogorodnikova***

Ural Federal University, 19, ul. Mira, Yekaterinburg, 620002, Russia; *e-mail: Olga.Ogorodnikova@UrFU.ru

Received July 7, 2023. Revised September 8, 2023. Accepted October 24, 2023.

The thermo-physical properties of molding materials for sand casting depend on changes in the composition of binders under thermal action on the technological equipment made from sand-based mixtures. We present the results of developing an algorithm for modeling the thermo-physical properties of molding materials used in sand casting. We used the solution of the inverse problem of heat conduction by the Levenberg – Marquardt method which suggested using iterations to the results of solving the direct problem of calculating the non-stationary temperature field. The direct problem of the nonlinear thermal conductivity upon solidification of a casting in a sand mold was solved using the LVMFlow program. Data on the temperature field during solidification of the AK7 alloy casting in a sand mold were obtained using thermocouples. The accuracy of temperature measurements with thermocouples was assessed in relation to sand casting processes depending on the casting dimensions and the melting temperature of the casting alloy. Thermocouples with chromel-constantan electrodes are recommended for the experimental determination of temperature fields in aluminum alloy castings. The proposed algorithm is intended for processing data on temperature fields measured by thermocouples upon solidification of castings in a sand mold and calculated by simulating the identical casting process in the LVMFlow program. The developed algorithm is implemented in the SciLab software environment and ensures the correct construction of the Jacobian matrix. The results obtained can be used in computer simulation of casting technology, taking

into account the thermo-physical properties of mold materials, which reduces the time spent for the development of technological processes and equipment.

Keywords: simulation; foundry technologies; molding materials; thermo-physical properties; inverse problem of heat conduction.

Введение

В компьютерном моделировании технологий можно выделить класс высокотемпературных процессов, математическая модель которых основана на нелинейном уравнении теплопроводности. В нелинейном уравнении коэффициенты, представляющие теплофизические характеристики материалов, зависят от температуры, поэтому численное решение уравнения — вычисление нестационарного температурного поля решением прямой задачи теплопроводности — выполняют итерационно с уточнением на каждой итерации текущих значений коэффициентов [1, 2].

К высокотемпературным относят технологические процессы с использованием интенсивных источников энергии для нагрева и плавления материалов (литье, сварка, термообработка, пайка, наплавка, кислородная резка, выращивание монокристаллов, лазерные, аддитивные, плазменные и ионные технологии и др.) [3]. Для реализации технологических процессов изготавливают оснастку из металлических и неметаллических материалов. Компьютерное моделирование высокотемпературных процессов требует в качестве входных данных теплофизические свойства материалов во всем интервале нагрева и охлаждения. Свойства (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность) могут быть представлены в базе данных симулятора технологий табличными функциями с линейной интерполяцией между заданными точками (например, программа LVMFlow). Другой вариант представления данных о свойствах — аппроксимирующие функции первого или второго порядка с разбиением всего температурного интервала на характерные участки (например, программа SolidCast).

В решении прямой задачи теплопроводности при компьютерном моделировании технологии литья учитываются свойства литейного сплава и материалов формы, в которой происходит кристаллизация сплава и охлаждение отливки. Свойства металлических сплавов обусловлены содержанием компонентов и фазовым составом, которые с высоким уровнем достоверности определяются экспериментально или вычисляются с помощью соответствующего программного обеспечения [4, 5]. Заметим, что если в передаче теплоты участвуют новые нестабильные материалы, смеси и композиты, то определение свойств бывает проблематичным. В некоторых случаях отсутствуют надежные методики экспе-

риментального измерения высокотемпературных характеристик материалов, например, прочности сплава вблизи температуры солидус [6].

Свойства неметаллического материала формы зачастую не удается определить по составу, поскольку в состав смесей входят компоненты, содержание и свойства которых не стандартизованы. Так, формовочные смеси на основе песка изготавливаются по техническим условиям предприятия из исходных веществ разного минералогического и зернового составов с большим разнообразием режимов уплотнения, отвердевания, сушки, спекания [7]. Более того, вода и смолы в составе песчаной смеси меняют агрегатное состояние, частично выходят в виде газов различного образом в зависимости от ряда параметров. Соответственно, возникает неопределенность входных данных для компьютерного моделирования процессов переноса теплоты в формовочных материалах на песчаной основе.

Неопределенность входных данных приводит к неточным результатам прогнозирования температурных полей, дефектов, потоков расплава. Данные корректируют с учетом адаптации к условиям производства и статистического анализа результатов множественных определений, валидацией и верификацией измерений [8, 9]. Вместе с тем более прогрессивное направление корректировки входных данных для повышения точности компьютерного моделирования высокотемпературных технологий — решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности [10].

Цель работы — разработка алгоритма моделирования теплофизических свойств песчаных формовочных смесей в составе компьютерной модели технологических процессов литья.

Решение обратной задачи теплопроводности для уточнения коэффициентов нелинейного уравнения теплопроводности

При компьютерном моделировании высокотемпературных технологий анализ технологических параметров, кинетики и динамики процессов или структурных преобразований основан на изменении расчетных температурных полей [11]. Распределение температуры в моделируемом пространстве определяется численным решением нелинейного дифференциального уравнения второго порядка в частных производных,

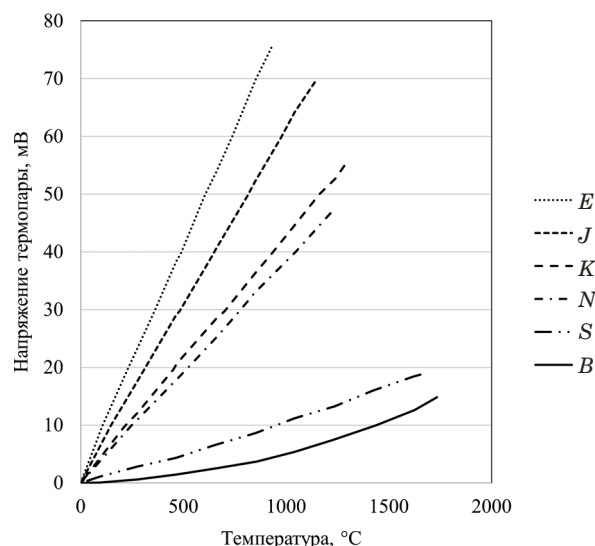


Рис. 1. Зависимость напряжения от температуры для термопар типов *B* (платинородий-платинородий), *S* (платинородий-платина), *E* (хромель-константан), *J* (железо-константан), *K* (хромель-алюмель) и *N* (нихросил-нисил)

Fig. 1. Temperature dependence of voltage for thermocouples of types *B* (platinorodum-platinorodum), *S* (platinorodum-platinum), *E* (chromel-constantane), *J* (iron-constantane), *K* (chromel-alumel), *N* (nichrosyl-nisyl)

коэффициенты которого — теплофизические свойства материалов [12].

Обратная задача теплопроводности состоит в отыскании коэффициентов уравнения теплопроводности по известным значениям температуры, полученным экспериментально [13]. В процессе решения обратной задачи стремятся совместить расчетное температурное поле с экспериментальными данными, меняя коэффициенты в уравнении теплопроводности.

Для решения обратной задачи применяют различные математические методы (квазиобращения, Левенберга – Марквардта, регуляризации на компактных множествах, регуляризации по Тихонову и др.) [14 – 16]. При этом численное решение нелинейных задач реализуется итерационно. В данном случае обратную задачу теплопроводности решали методом Левенберга – Марквардта, особенность и преимущество которого заключаются в том, что основанный на этом методе алгоритм обработки данных не запрашивает пространственные координаты узлов расчетной сетки. Такой подход позволяет решать поставленную задачу на произвольных геометрических объектах [17]. В нашем случае задача решалась для цилиндрической геометрии тестового образца, что упрощало модель и приближало задачу к осесимметричной или одномерной постановке. Отметим, что сам алгоритм применим к сложным пространственным геометриям фасонных и крупногабаритных отливок, температурное поле

которых можно экспериментально регистрировать термопарами в цеховых условиях. Это делает разрабатываемый программный инструментальный пригодным для настройки компьютерных моделей и корректировки реальных технологий изготовления ответственных литых деталей [18].

Метод Левенберга – Марквардта предполагает также, что алгоритм обработки данных итерационно запрашивает результаты решения прямой задачи теплопроводности. Решение прямой задачи на каждой уточняющей итерации выполняли с использованием программы LVMFlow. В этой программе была настроена вычислительная модель, позволяющая записывать расчетные кривые изменения температуры при кристаллизации сплава в литейной форме.

Влияние термопары на точность расчета температурных полей

Натурные эксперименты по определению температурного поля при кристаллизации сплава АК7 проводили на цилиндрических отливках диаметром 10 мм, которые охлаждались в песчаной форме диаметром 100 мм. Для испытаний выбрали промышленный алюминиевый сплав, поскольку в конструкторско-технологической подготовке производства актуальна настройка вычислительных моделей в привязке к используемым материалам и программам.

Температуру измеряли с помощью двух термопар, погруженных в расплав. Использовали интегральные термопары типа *B* (платинородий 30 %/платинородий 6 %) в керамической трубке, состоящей из высокочистого оксида алюминия [1]. Для удлинения термоэлектродов и подключения термопар к видеографическому регистратору использовали компенсационные провода медь – никель.

Используемая термопара применима для расплавленной стали, но имеет низкую номинальную чувствительность (7,7 мВ/К). Для нее требуется усилитель с низкими шумами для усиления напряжения на выходе. В противном случае показания датчика могут быть некорректно преобразованы. На рис. 1 показана выходная характеристика термопары типа *B* в сравнении с другими термопарами, которые отличаются материалами термоэлектродов. Заметим, что если эксперимент ограничен сплавами с температурой плавления до 900 °C, то предпочтительней термопара типа *E* с хромель-константановыми электродами.

При размерах образца, соизмеримых с размерами термопары, сама термопара может внести искажения в измерение температуры, и возникает вопрос о включении термопары в вычислительную модель. Действительно, измеренные

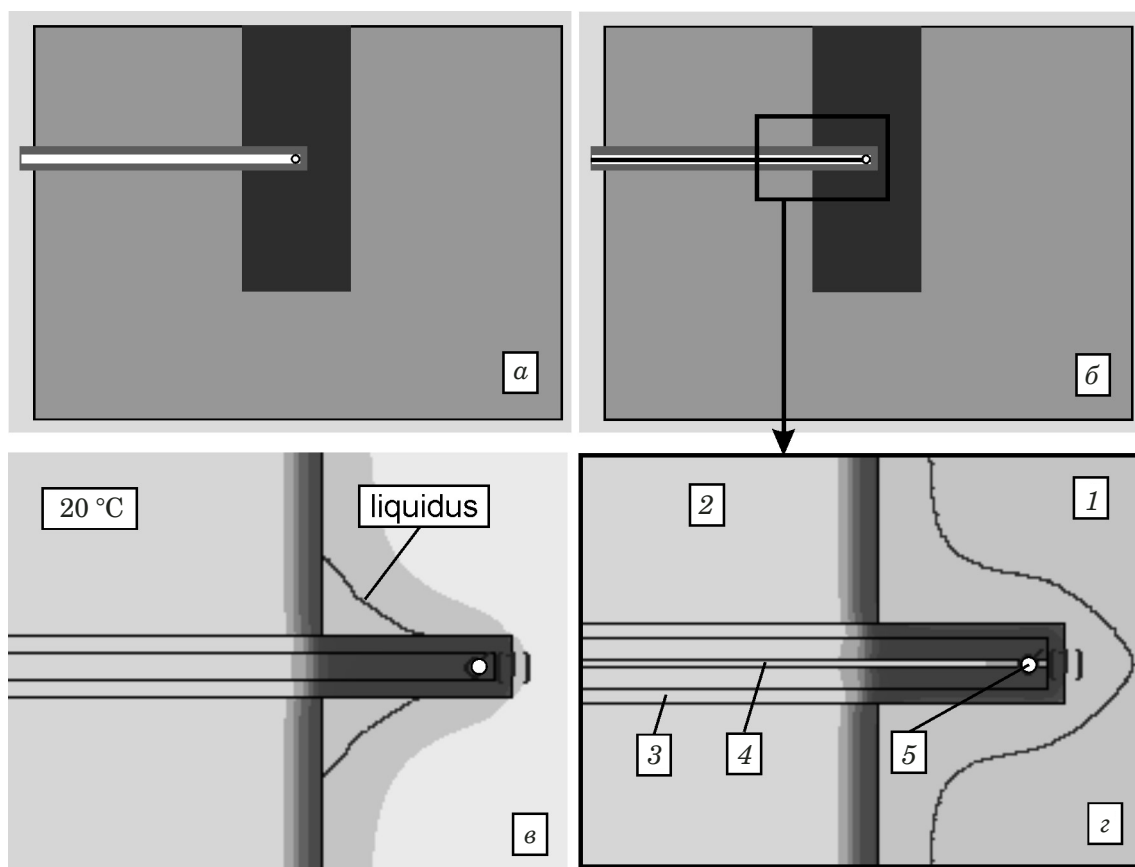


Рис. 2. Варианты представления термопары в вычислительной модели (а, б) и соответствующее температурное поле в сечении цилиндрической геометрии (в, г) спустя 1,5 с после заливки расплава в форму: 1 — расплав; 2 — песчаная форма; 3 — стеклянный колпачок; 4 — платинородиевый электрод; 5 — сенсор температуры

Fig. 2. Representation of a thermocouple in the computational model (a, b) and the corresponding temperature field in a section of cylindrical geometry (c, d) 1.5 sec after pouring the melt into the mold: 1 — melt; 2 — sand mold; 3 — glass cap; 4 — platinum-rhodium electrode; 5 — temperature sensor

температурные кривые содержат систематическую ошибку на начальном этапе, которая выявляется по калибровочной точке — температуре расплава, поскольку она известна заранее.

Моделирование процесса кристаллизации выполняли в программе LVMFlow. В вычислительной модели задавали разные варианты регистрации температуры в точке расположения горячего спая термопары. Были рассмотрены варианты модели без термопары, с упрощенным и полным представлением термопары. На рис. 2 представлены варианты с упрощенной геометрией, когда термопара присутствует в виде: 1) стеклянного колпачка (см. рис. 2, а); 2) платинородиевого электрода в стеклянном колпачке (см. рис. 2, б). Во втором случае расчетная температура в начальный период снижается (см. рис. 2, г) и приближается к искаженным экспериментальным данным.

Температурные поля получены решением прямой задачи теплопроводности (программа LVMFlow) и представляют два варианта теплоотвода от точки измерения температуры. В первом

(см. рис. 2, в) теплоотвод осуществляется через стеклянную трубку и воздух, ее наполняющий. Во втором варианте (см. рис. 2, г) на теплоотвод влияет тонкий металлический стержень, которому в модели для стержня назначены теплофизические свойства платинородиевого электрода. При этом программа LVMFlow позволяет в точке сенсора 5 вывести температурную кривую охлаждения и количественно оценить разницу температур для вариантов вычислительной модели в сравнении с экспериментальными результатами.

Получили, что в момент времени 50 с температура в точке сенсора для второго варианта модели совпадает с экспериментальным значением и составляет 550 °C, что на 50 °C ниже аналогичного значения для первого варианта. Первому варианту упрощенной модели соответствует график (рис. 3), показывающий количественное отличие значений температуры, измеренных экспериментально и вычисленных в точке местоположения горячего спая термопары.

Из анализа температурных полей вычислительной модели можно предположить, что для

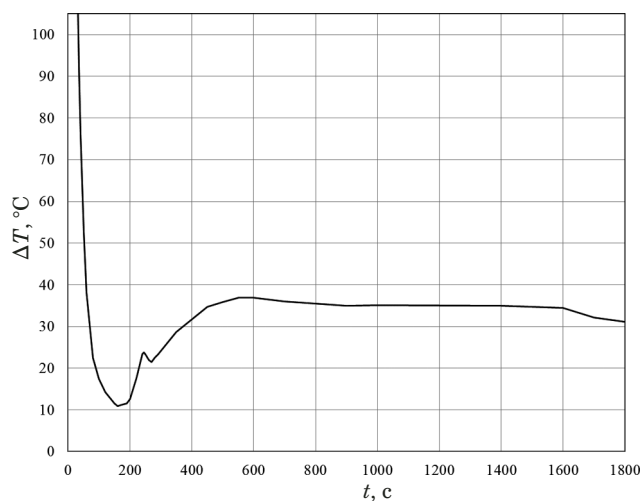


Рис. 3. Временная зависимость разности значений температуры ΔT , измеренной экспериментально и вычисленной в точке местоположения горячего спая термопары с использованием компьютерной модели без корреляции свойств песчаной смеси

Fig. 3. Time dependence of the difference in the temperature values ΔT measured experimentally and calculated at the site of the thermocouple hot junction using a computer model before correcting the properties of the sand mixture

повышения точности измерения температуры термопарой в заводских условиях необходимо уменьшить длину компенсационного медно-никелевого провода от литейной формы до регистратора, а также усилить его теплоизоляцию. Отметим, что корректировка компьютерной модели в заводских условиях становится эффективной в случае подготовки производства крупногабаритных фасонных отливок. После корректировки компьютерной модели по свойствам формовочных материалов и теплоотводу в программной среде LVMFlow можно быстро проанализировать большое количество вариантов технологической оснастки, что важно в случае дорогостоящих и технологически сложных литых деталей.

Алгоритм для решения обратной задачи теплопроводности

Суть использования метода Левенберга – Марквардта в численном решении обратной задачи теплопроводности применительно к компьютерному моделированию технологий литья заключается в оценке влияния каждой учтенной точки температурной зависимости свойств материала на смещение расчетных кривых изменения температуры в заданных точках технологического пространства. Метод дает возможность выполнить локальную оптимизацию, оценить тенденцию необходимого изменения элементов вектора свойств и показать относительную значимость каждого элемента.

В вычислительных экспериментах по решению прямой задачи теплопроводности (программа LVMFlow) исследовали каждую точку дискретной температурной зависимости теплофизических свойств. Выявляли те точки, изменение которых приводит к приближению расчетной температурной кривой к экспериментальной.

Свойства песчаной смеси корректировали, соответственно, подлежащие проверке и возможному изменению точки температурной зависимости теплопроводности и удельной теплоемкости смеси были организованы в виде векторного аргумента $\{P\}$ — единого вектора-столбца значений свойств. Зафиксированные в натурных или вычислительных экспериментах значения температуры были организованы в виде векторной функции $\{T\}$ — вектора-столбца значений температуры.

По результатам вычислительных экспериментов была составлена матрица Якоби J как частная производная векторной функции $\{T\}$ (N элементов) по векторному аргументу $\{P\}$ (M элементов).

Предложенный алгоритм корректировки теплофизических свойств формовочного материала на основе песка включал:

- 1) метод Левенберга – Марквардта для решения обратной задачи теплопроводности;
- 2) формирование температурной зависимости свойства, начиная с исходного значения, которое присваивалось двум крайним точкам температурного интервала;
- 3) итерационный подход, уплотняющий график зависимости свойства на каждой итерации (добавлялась новая точка между двумя существующими по линейному закону, и таким образом минимизировался объем вычислений);
- 4) проверку и исключение из формирования матрицы Якоби сингулярных точек по коэффициенту близости температурной кривой в пробных вычислительных экспериментах к исходной расчетной кривой, что обеспечивало обратимость матрицы;
- 5) формирование квадратной матрицы Якоби с помощью выбора точек температурной кривой в количестве, равном числу точек свойств ($N = M$).

Исключить сингулярные точки при формировании матрицы Якоби необходимо, поскольку они не вызывают смещения расчетной температурной кривой. Фиксация кривой означает, что итоговое значение свойства достигнуто и его дальнейшее изменение не требуется, либо сингулярная точка не влияет на процесс теплообмена. Например, в вектор свойств включено значение свойства при температуре 800 °С, а температура расплава равна 720 °С, т.е. в вычислительной модели отсутствуют объемы, нагретые до 800 °С.

Практическая реализация

Разработанный алгоритм реализован и исследован в программной среде SciLab версии 6.1.1. Программа SciLab выбрана для проверки разработанного алгоритма, так как она имеет средства для матричных вычислений.

Поскольку в натурном испытании исследовали кристаллизацию алюминиевого сплава АК7, температура плавления которого не превышала 700 °С, в решении обратной задачи было принято физическое ограничение входных данных: свойства песчаной смеси рассматривали в диапазоне 20 – 700 °С. Теплопроводность песчаной смеси при нагреве и охлаждении в технологическом процессе литья неоднородно меняли по объему литейной формы в зависимости от ряда факторов, включающих испарение влаги, выделение газа, структурные превращения компонентов смеси. В компьютерной модели технологического процесса литья функция теплопроводности для некоторого объема материала играла роль интегральной характеристики, не зависящей от времени; аргумент функции — температура.

Для проведения вычислительного эксперимента в базе данных LVMFlow создали запись о тестовом формовочном материале, плотность и удельную теплоемкость которого задавали константами, а теплопроводность представляли в виде температурной зависимости. Температурная зависимость теплопроводности $k(T)$ для тестового формовочного материала соответствовала экспериментальным данным для песчаной смеси со связующим веществом на основе фурановой смолы. Относительно данной зависимости (точного решения) проводили проверку сходимости алгоритма в вычислительном эксперименте.

Моделирование процесса кристаллизации сплава АК7 осуществляли в программе LVMFlow. Получили температурную кривую в геометрическом центре цилиндрической отливки, которая затвердевает и охлаждается в цилиндрической форме из тестового формовочного материала. Данная кривая (назовем ее квазиэкспериментальной) играла роль экспериментального изменения температуры, зарегистрированного термопарой. Далее имитировали ситуацию, при которой теплопроводность формовочного материала неизвестна и необходимо ее восстановить решением обратной задачи теплопроводности.

На рис. 4 показано приближение температурной зависимости теплопроводности для тестового формовочного материала в итерациях разработанного алгоритма. Сходимость результата расчета к квазиэкспериментальным данным можно оценить по изменению коэффициента качества в итерациях алгоритма. Коэффициент качества, вычислявшийся как отношение $\Sigma |T^e - T| / \Sigma T^e$

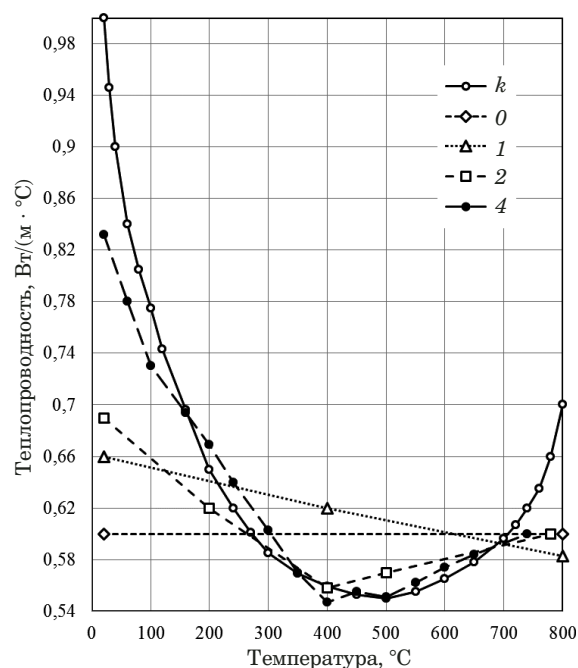


Рис. 4. Восстановление температурной зависимости теплопроводности в итерациях разработанного алгоритма: k — базовая зависимость (точное решение); 0 — исходная расчетная зависимость; 1–4 — зависимости после соответствующих итераций (приближенные решения)

Fig. 4. Reconstruction of the temperature dependence of the thermal conductivity in iterations of the developed algorithm: k — basic curve (exact solution); 0 — initial calculated curve; 1–4 — curves after corresponding iterations (approximated solutions)

(T — расчетное значение температуры, T^e — значение температуры в аналогичный момент времени для квазиэкспериментальной кривой в той же точке геометрической модели), в итерациях алгоритма снижался с 3,79 до 0,4 %, т.е. расчетная кривая в точке расположения сенсора температуры уверенно приближалась к квазиэкспериментальной температурной кривой.

Заметим, что предложенный алгоритм тем надежнее находит верное значение свойства при некоторой температуре, чем большее время и в большем объеме соответствующая температура фиксируется в системе. Так, в центральном интервале 300 – 500 °С точки свойств наделяются более высоким весовым коэффициентом, чем в крайних интервалах вблизи 20 и 700 °С. В целом, разработанный алгоритм можно использовать более эффективно, если корректировать теплопроводность формовочной смеси, исходя из имеющейся зависимости для близкой по составу песчаной смеси, т.е. выполнять относительно небольшие смещения точек стартовой кривой.

Заключение

Таким образом, предложен алгоритм подготовки входных данных о теплофизических свой-

ствах формовочных материалов для компьютерного моделирования технологических процессов литья. Необходимость уточнения свойств смесей на основе песка в заводских условиях возникает из-за отсутствия стандартов на составы таких смесей в отличие от металлических сплавов, свойства которых либо известны, либо могут быть определены. Алгоритм основан на решении обратной задачи теплопроводности методом Левенберга – Марквардта и изменяет вектор исходных значений свойств, совмещая расчетные и экспериментальные данные о нестационарном температурном поле. Исключая из расчета сингулярные точки свойств, алгоритм формирует квадратную матрицу Якоби, а метод Левенберга – Марквардта позволяет быстро приближаться к точному решению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартыненко С. В., Огородникова О. М. Компьютерное моделирование технологии изготовления отливки «Рама боковая» с использованием программы LVMFlow / Литейное производство. 2022. № 7. С. 23 – 28.
2. Мордасов С. А., Негуляева А. П., Чернышев В. Н. Контроль теплофизических характеристик строительных материалов адаптивным методом с использованием СВЧ-нагрева / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 2. С. 30 – 36. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36
3. Князева А. Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий. — Томск: Томский политехнический университет, 2009. — 357 с.
4. Шорстов С. Ю., Мараховский П. С., Пахомкин С. И., Размахов М. Г. Исследование теплоемкости жаропрочного никелевого сплава ВЖМ4 методами дифференциальной сканирующей калориметрии, адиабатическим и калориметрии смещения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 12. С. 30 – 35. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-12-35-40
5. Dai S., Wang Y., Chen F., et al. Design of new biomedical titanium alloy based on d-electron alloy design theory and JMatPro software / Transactions of nonferrous metals society of China. 2023. Vol. 23(10). P. 3027 – 3032. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62829-0
6. Огородникова О. М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации / Литейное производство. 2012. № 9. С. 21 – 24.
7. Okimura Y., Kato Y., Makino H., et al. Proposition of new yield criterion for green sand mold and its experimental validation by FEM stress analysis of triaxial compression test / Journal of materials processing technology. 2023. Vol. 318. 118020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118020
8. Jia Y., Zou Q., Chen X., et al. Study on heat transfer behavior and process optimization in differential phase electromagnetic DC casting of extra-large AZ31B alloy flat ingot: numerical simulation and experimental verification / Journal of materials research and technology. 2023. Vol. 24. P. 1108 – 1131. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.03.014
9. Голубкова Е. В., Комина И. Г., Чиканцева Е. И. Валидация и верификация методик измерений: мнения и взгляды / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 2. С. 77 – 80. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-77-80
10. Огородникова О. М., Мартыненко С. В. Расчетно-экспериментальная корректировка баз данных для компьютерного моделирования литейных процессов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 10. С. 40 – 43.
11. Огородникова О. М., Рябов Д. Г., Радя В. С. Компьютерное моделирование теплового режима изложницы при кристаллизации слитков черновой меди / Цветные металлы. 2013. № 5. С. 89 – 93.
12. Новиков С. В., Смирнов А. В., Исаенкова М. Г., Ермакова Н. С. Исследование остаточных термических напряжений в твердосплавных покрытиях, полученных по электроимпульсной технологии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 42 – 45. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-42-45
13. Oliveira A., Avrit A., Gradeck M. Thermocouple response time estimation and temperature signal correction for an accurate heat flux calculation in inverse heat conduction problems / International journal of heat and mass transfer. 2022. Vol. 185. 122398. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122398
14. Wang Y., Qian Z. A quasi-reversibility method for solving a two-dimensional time-fractional inverse heat conduction problem / Mathematics and computers in simulation. 2023. Vol. 212. P. 423 – 440. DOI: 10.1016/j.matcom.2023.05.012
15. Огородникова О. М., Мартыненко С. В. Применение алгоритма Левенберга – Марквардта в компьютерном моделировании литейных дефектов / Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 63 – 68.
16. Ngendahayo J., Niyobuhungiro J., Berntsson F. Estimation of surface temperatures from interior measurements using Tikhonov regularization / Results in applied mathematics. 2021. Vol. 9. 100140. DOI: 10.1016/j.rinam.2020.100140
17. Zhou Y., Wei D., Wang Y., et al. Inverse estimation of unknown thermophysical properties of green facades using the Levenberg – Marquardt algorithm / Energy and Buildings. 2023. Vol. 292. 113179. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113179
18. Bekele B., Bhaskaran J., Tolcha S., Gelaw M. Simulation and experimental analysis of re-design the faulty position of the riser to minimize shrinkage porosity defect in sand cast sprocket gear / Materials today: proceedings. 2022. Vol. 59. N 1. P. 598 – 604. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.090

REFERENCES

1. Martynenko S. V., Ogorodnikova O. M. Simulation of the manufacturing technology for the Frame casting using the LVMFlow program / Lit. Proizv. 2022. N 7. P. 23 – 28 [in Russian].
2. Mordasov S. A., Negulyaeva A. P., Chernyshov V. N. Control of the thermophysical characteristics of building materials by the adaptive method using microwave heating / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2020. Vol. 86. N 2. P. 30 – 36 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36
3. Knyazeva A. G. Thermophysical foundations of modern high-temperature technologies. — Tomsk: Tomsky Politechnicheskiy Universitet, 2009. — 357 p. [in Russian].
4. Shorstov S. Yu., Marakhovsky P. S., Pakhomkin S. I., Razmakhov M. G. Investigation of heat capacity of high-temperature nickel alloy VZhM4 by differential scanning calorimetry, adiabatic and mixing calorimetry / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2021. Vol. 87. N 12. P. 30 – 35 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-12-35-40
5. Dai S., Wang Y., Chen F., et al. Design of new biomedical titanium alloy based on d-electron alloy design theory and JMatPro software / Transactions of nonferrous metals society of China. 2023. Vol. 23(10). P. 3027 – 3032. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62829-0
6. Ogorodnikova O. M. Stress-strain state of the metal in the effective range of crystallization / Lit. Proizv. 2012. N 9. P. 21 – 24 [in Russian].
7. Okimura Y., Kato Y., Makino H., et al. Proposition of new yield criterion for green sand mold and its experimental validation by FEM stress analysis of triaxial compression test / Journal of materials processing technology. 2023. Vol. 318. 118020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118020
8. Jia Y., Zou Q., Chen X., et al. Study on heat transfer behavior and process optimization in differential phase electromagnetic DC casting of extra-large AZ31B alloy flat ingot: numerical sim-

- ulation and experimental verification / *Journal of materials research and technology*. 2023. Vol. 24. P. 1108 – 1131. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.03.014
9. **Golubkova E. V., Komina I. G., Chikantseva E. I.** Validation and verification of measurement methods: opinions and views / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 2. P. 77 – 80 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-77-80
10. **Ogorodnikova O. M., Martynenko S. V.** Computational-experimental correction of databases for computer modeling of foundry processes / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2015. Vol. 81. N 10. P. 40 – 43 [in Russian].
11. **Ogorodnikova O. M., Ryabov D. G., Radya V. S.** Computer simulation of the thermal regime of the mold during the crystallization of blister copper ingots / *Tsvet. Met.* 2013. N 5. P. 89 – 93 [in Russian].
12. **Novikov S. V., Smirnov A. V., Isayenkova M. G., Ermakova N. S.** Study of residual thermal stresses in hard-alloy coatings obtained by electropulse technology / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 11. P. 42 – 45 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-42-45
13. **Oliveira A., Avrit A., Gradeck M.** Thermocouple response time estimation and temperature signal correction for an accurate heat flux calculation in inverse heat conduction problems / *International journal of heat and mass transfer*. 2022. Vol. 185. 122398. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122398
14. **Wang Y., Qian Z.** A quasi-reversibility method for solving a two-dimensional time-fractional inverse heat conduction problem / *Mathematics and computers in simulation*. 2023. Vol. 212. P. 423 – 440. DOI: 10.1016/j.matcom.2023.05.012
15. **Ogorodnikova O. M., Martynenko S. V.** Application of the Levenberg – Marquardt algorithm in computer modeling of casting defects / *Defektoskopiya*. 2015. N 5. P. 63 – 68 [in Russian].
16. **Ngendahayo J., Niyobuhungiro J., Berntsson F.** Estimation of surface temperatures from interior measurements using Tikhonov regularization / *Results in applied mathematics*. 2021. Vol. 9. 100140. DOI: 10.1016/j.rinam.2020.100140
17. **Zhou Y., Wei D., Wang Y., et al.** Inverse estimation of unknown thermophysical properties of green facades using the Levenberg – Marquardt algorithm / *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 292. 113179. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113179
18. **Bekele B., Bhaskaran J., Tolcha S., Gelaw M.** Simulation and experimental analysis of re-design the faulty position of the riser to minimize shrinkage porosity defect in sand cast sprocket gear / *Materials today: proceedings*. 2022. Vol. 59. N 1. P. 598 – 604. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.090