

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ

Г. А. Мустафин, Т. В. Мустафина, А. П. Гроссу

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
г. Барнаул, Россия

В различных областях науки и техники широко используются методы математического моделирования. Эти методы включают в себя разработку математических моделей, численных методов решения и программного обеспечения, проведение численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники. Преимущества математического моделирования очевидны: оптимизация проектирования, сокращение затрат на разработку технологии, повышения качества продукции, уменьшение эксплуатационных расходов и так далее.

Математическое моделирование существенно преобразует также сам характер научных исследований, устанавливая новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами. Применение математического моделирования в литейном производстве привело к появлению большого числа программных пакетов, с помощью которых более или менее успешно решаются задачи, с которыми литейщики сталкиваются в повседневной практике.

В основе математической модели литейных процессов лежат уравнения теплопереноса, уравнения теплопроводности, диффузии и так далее. Расчетная область включает не только объем отливки, но и формообразующую среду с различными граничными и начальными условиями. Возможен учет цикличности процесса литья (например, литье в многоразовые формы).

Программы для моделирования литейных процессов, распространенных в настоящее время, в основном различаются степенью полноты учитываемых при моделировании факторов. Наиболее часто используют следующие методы численного решения: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов, метод граничных элементов.

Два наиболее часто применяемых метода в системе моделирования литейных процессов – это метод конечных элементов и

метод конечных разностей. Метод конечных разностей (МКР), положенный в основу разработанной программы [1], базируется на уравнениях в дифференциальной форме. При этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках. Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к решению последовательных одномерных задач, а значит намного упростить и ускорить решение общей системы уравнений.

Реологические исследования показали, что при нагреве стального кокиля до температур 900 °С и выше происходит интенсивное образование в стенке кокиля остаточных деформаций. Последние вызывают после охлаждения кокиля образование остаточных напряжений, что отрицательно сказывается на их долговечность. С помощью разработанной программы рассчитаны температуры стального кокиля при охлаждении в нем чугуновых отливок различной толщины. По этим расчетам построены термограммы, приведенные на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что опасную температуру прогрева металлическая форма получает при всех рассматриваемых толщинах отливок. С увеличением толщины отливки возрастает так же и длительность пребывания формы при опасных температурах. Так например, при отливке из чугуна толщиной 10 мм форма находится при опасной температуре 54 с, а при отливке толщиной 100 мм – 170 с.

Эти данные можно использовать также для оценки степени термохимического насыщения поверхности отливки (поверхности формы). Чем выше температура и длительность действия температур выше 850 °С, тем больше толщина насыщенного слоя.

Аналогичные расчеты были проведены для алюминиевой отливки при толщине краски 0,002 м. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ

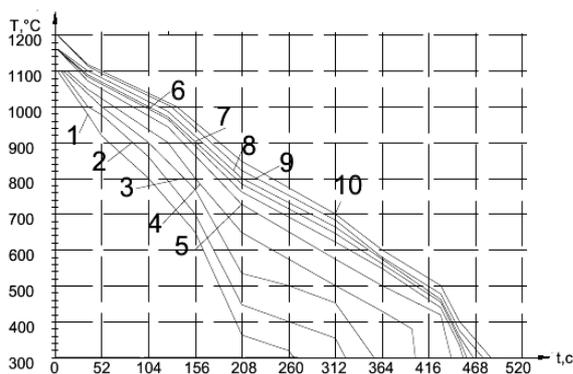


Рисунок 1 – График зависимости времени пребывания формы от определенной температуры при толщине чугуновой отливки: 1 – 0,01 м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,03 м; 4 – 0,04 м; 5 – 0,05 м; 6 – 0,06 м; 7 – 0,07 м; 8 – 0,08 м; 9 – 0,09 м; 10 – 0,1 м

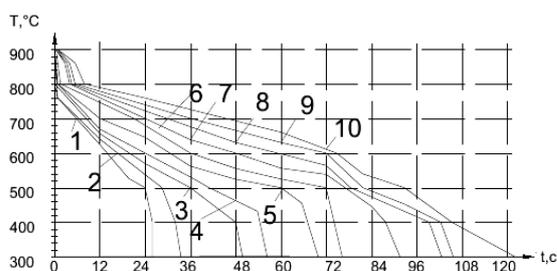


Рисунок 2 – График зависимости времени пребывания формы от определенной температуры при толщине алюминиевой отливки: 1 – 0,01 м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,03 м; 4 – 0,04 м; 5 – 0,05 м; 6 – 0,06 м; 7 – 0,07 м; 8 – 0,08 м; 9 – 0,09 м; 10 – 0,1 м

Фактором, влияющим на долговечность кокиля, кроме склонности образованию остаточных деформаций является жаростойкость. Известно, что углеродистая сталь начинает интенсивно окисляться при температурах выше 600 °С.

Из графиков, представленных на рисунках 1 и 2, видно, что такую температуру обеспечивают все рассмотренные отливки. Длительность пребывания увеличивается с повышением толщины стенок отливок. Так, например, при толщине чугуновой отливки 10 мм время пребывания при температурах свыше 600 °С - 160 с, а при толщине 100мм – 364 с.

Разработанная программа использовалась также для исследования влияния свойств газового зазора на теплообмен меж-

ду отливкой и формой. Под зазором понимается вещество, заполняющее пространство между отливкой и кокилем в процессе их взаимодействия. В реальных условиях литья возможны различные составы газовой фазы зазора, которые оказывают существенное влияние на характер теплового, силового и даже диффузионного взаимодействия между отливкой и формой.

По полученным данным были рассчитаны температуры металлической формы, которые она имела в момент выбивки отливки при температуре 800 °С. Отливка из серого чугуна толщиной 20 мм достигала температуры выбивки в течение 164 с. На рисунке 3 приведено расчетное распределение температур формы без учета и с учетом газового зазора.

Из графиков, представленных на рисунке, видно, что с появлением зазора заметно изменяется величина теплоотдачи от отливки к форме. Так, например, на удалении 0,014 м от поверхности отливки температура формы без учета газового зазора будет равна 510 °С, а с учетом газового зазора – 460 °С.

Изучение закономерностей изменения величины газового зазора относится к числу чрезвычайно важных практических задач. Причем во многих случаях термическое сопротивление, создаваемое зазором, становится определяющим фактором тепловых условий литья. Тогда управление процессом формирования отливки путем изменения толщины покрытия кокиля оказывается менее эффективным.

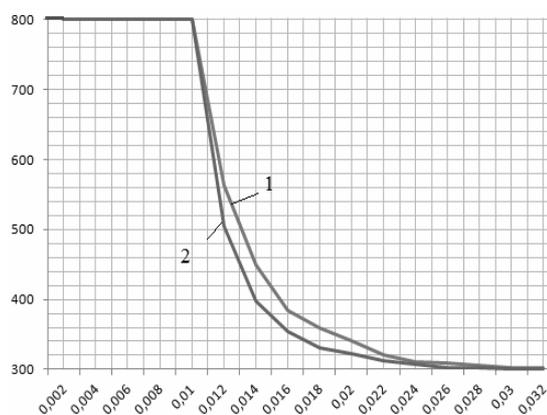


Рисунок 3 – Распределение температур в металлической форме: 1 – без учета газового зазора; 2 – с учетом газового зазора

Действительно, величина газового зазора примерно на порядок меньше, чем толщина покрытия (слоя краски). При толщине газового зазора  $X_g = 0,2$  мм создается такое же термическое сопротивление, как и при покрытии кокиля толщиной 2 мм. При литье в кокили такая толщина покрытия практически не достижима. Однако величиной газового зазора трудно управлять. Поэтому покрытие пока является главным фактором управления интенсивностью нагрева металлической формы.

С помощью разработанной программы проанализировано влияние на тепловую картину формы ее толщины и охлаждения с наружной поверхности.

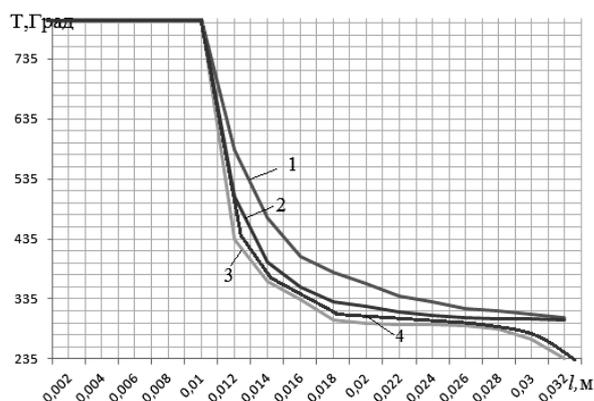


Рисунок 4 – Распределение температурных полей в металлической форме при выбивке отливки: 1 – без учета газового зазора; 2 – с учетом газового зазора; 3 – с учетом газового зазора и конвективного теплоотвода внешней поверхности формы; 4 – с учетом газового зазора, конвективного теплоотвода внешней поверхности формы и зависимостей теплофизических свойств от температуры

Теплообмен между отливкой и формой осуществляется теплопроводностью (кондукцией) и конвекцией. Два вида теплообмена –

теплопроводность и конвекция – существуют всегда нераздельно и обычно объединяются в понятие теплообменом соприкосновением. При практических расчетах теплового потока наибольшей трудности представляет определение коэффициента теплоотдачи с поверхности отливки  $a_c$ .

Теплофизические свойства веществ зависят от ряда факторов, в том числе и от температуры. Для определения температурной зависимости свойств многочисленные литературные данные были обработаны и построены алгебраические зависимости. Нахождение данных по теплофизическим свойствам в таком виде облегчает расчет температур. Результаты расчетов охлаждения чугунной отливки толщиной 20 мм до температуры выбивки равной  $800^{\circ}\text{C}$  приведены на рисунке 4. Как видно из приведенных данных, теплоотдача с внешней поверхности формы (тонкая в тепловом отношении форма) заметно меняет тепловую картину в форме. А зависимость теплофизических свойств от температуры не оказывает существенного влияния на тепловой фон литейной формы и эту зависимость можно не учитывать в практических расчетах или использовать поправочный коэффициент. При учете зависимости теплофизических свойств от температуры, рассчитываемые значения температурных полей с меньшей погрешностью отличаются от экспериментальных измерений.

#### Список литературы:

1. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013618009. Расчет температурных полей в многослойной форме /Г.А. Мустафин, Т.В. Мустафина, А.П. Гроссу. – № 2013615793; заявл. 04.07.2013; регистр. в Реестре программ для ЭВМ 28.08.2013г.