

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В СИСТЕМЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Бройтман О.А.

При отработке технологии получения отливки перед пользователем моделирующей системы встаёт ряд задач, для которых нет необходимости или возможности, ввиду значительной сложности протекающих процессов, применить численное решение. Зато в результате моделирования практически в любом расчётном литейном пакете у пользователя есть главное – расчётные поля температур в отливке и форме в любой момент времени в течение процесса затвердевания. Естественно, наличие такой информации само по себе уже ценно – можно наблюдать появление тепловых узлов, эффективность отвода тепла либо, наоборот, утепления тех или иных частей отливки. Можно отметить, что технолог-литейщик обладает знанием некоторых критериев, по которым он определит по результатам просмотра полей температур места, в которых могут появиться усадочные дефекты. В случае применения системы компьютерного моделирования (СКМ ЛП) «ПолигонСофт» давать таким образом ответ на вопрос о появлении дефектов, конечно, не нужно, поскольку программа произведёт численный расчёт зон возникновения макро- и микропористости с помощью заложенных в неё сложных математических моделей. Но если представить, что всех этих сложных моделей нет, а оценку пористости произвести всё-таки нужно, и есть возможность производить вычисления над имеющимися значениями температур, то, очевидно, пришлось бы воспользоваться какими-то упрощёнными моделями, формулами, отражающими общие наблюдения за особенностями процесса возникновения усадки. Примером такого анализа является использование известного *критерия* Ниямы, с помощью которого может производиться *критеральная* обработка полей температур, формулируемого в виде:

$$Ni = \frac{G}{\sqrt{V_{охл}}}, \quad (1)$$

где G – температурный градиент, $V_{охл}$ – скорость охлаждения. В отсутствие более сложных моделей процесса формирования усадки формула (1) используется некоторыми программами анализа литейной технологии для предсказания усадочных дефектов.

Во многих случаях особенности протекания того или иного процесса не очевидны, строгие детерминированные модели включают массу констант и коэффициентов, которые сложно определить экспериментально, тем более для всех применяемых литейных сплавов, материалов форм и технологических условий. Иногда рациональным подходом в таких условиях является применение статистических моделей. Поскольку для большинства процессов, протекающих при формировании качества отливки, ведущим фактором является теплоотвод, то могут быть применены статистические модели, входными параметрами которых будут некоторые характеристики процесса теплоотвода (скорость охлаждения, температурные градиенты и др.). Примером реализации такого подхода является применение критериев по прогнозу прочности, твёрдости, структуры, опирающиеся на эмпирические формулы, в которых входным параметром является скорость охлаждения (рис. 1).

Модуль «Критерий-3D» в системе «ПолигонСофт» предназначен для анализа расчётных полей, полученных при моделировании литейной технологии. По завершении расчётов в СКМ ЛП пользователь располагает следующими данными: изменение во времени полей температур в отливке и форме при заливке и затвердевании, изменение полей скоростей в жидком металле при заливке, поля жидкой фазы в процессе затвердевания, поля давлений и пористости в отливке в процессе затвердевания. Это достаточно большой объём информации для того, чтобы пользоваться этими данными с выходом на различные параметры качества отливки и диагностировать литейную технологию. Весь вопрос только в том, чтобы был набор надёжных формул (аналитических, эмпирических, полуэмпирических), которые с известной долей упрощения позволят связывать имеющиеся расчётные поля с интересующим технолога

параметром качества. Такое математическое описание связи и есть критерий для обработки расчётных полей.

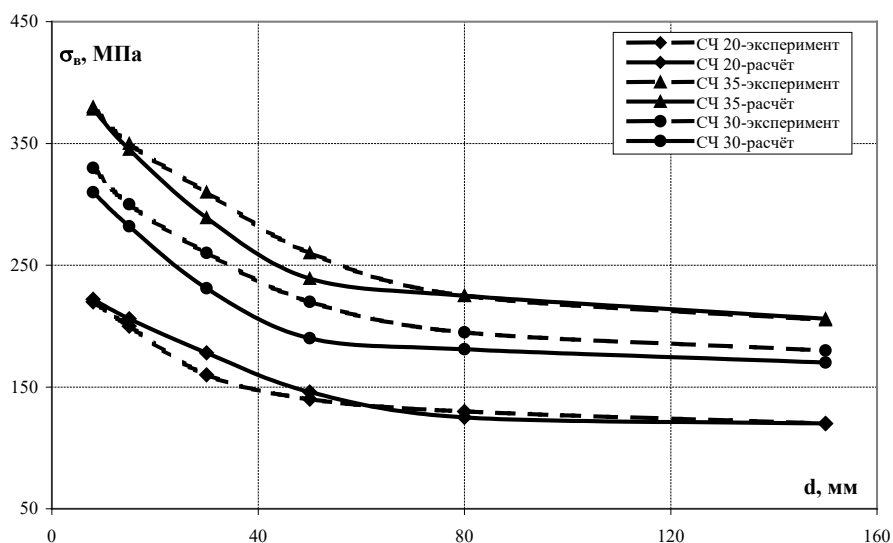


Рис. 1. Прогноз прочности в стандартных образцах различного диаметра d , залитых в песчано-глинистую форму: сравнение расчётных (по критерию «Прочность СЧ») и экспериментальных данных

Использовать как-то напрямую имеющиеся расчётные поля нет возможности, ведь в формулах критериев часто фигурируют такие обобщённые параметры процесса, как скорость охлаждения, время затвердевания, температурные градиенты и др. Поэтому необходимо, чтобы в программу, осуществляющую критериальный анализ, были заложены алгоритмы вычислений этих необходимых операционных параметров. Исходя из означенного требования в модуле «Критерий-3D» предусмотрена возможность произведения вычислений и операций со следующим стандартным набором критериальных переменных и функций: температуры ликвидус и солидус, перегрев, время затвердевания, скорость продвижения изоповерхности заданного пользователем значения, градиенты температурные и поля жидкой фазы, скорость изменения рассчитанной величины при достижении ею определённого значения, времена, в течение которых величина была выше или ниже определённого значения, возможность выявления максимальных и минимальных значений рассчитанной величины в локальной области и некоторые другие (рис. 2а). То, насколько широк набор стандартных критериальных функций и переменных, которыми умеет оперировать критериальный модуль, определяет границы применения модуля и потенциальную возможность составления сложных критериев, является одним из его основных достоинств.

Критерий часто базируется не на одной, а на некотором наборе формул. С учётом этого факта для удобства составления критерия предусмотрена вкладка «Переменные» в окне модуля «Критерий-3D», на которой пользователь может объявлять собственные переменные (рис. 2б), «сконструированные» из критериальных и стандартных математических функций, и использовать их в формулах критерия. Логика переходов от расчёта по одной либо другой формуле (если это необходимо) может быть описана на вкладке «Составные переменные» (рис. 2в).

Совместно с критериальным модулем поставляется библиотека критериев. Эта библиотека должна пополняться и пользователем путём составления собственных критериев. Библиотечные критерии могут беспрепятственно корректироваться. Совместно с загружаемыми в модуль «Критерий-3D» файлами, хранящими формулы библиотечных критериев, поставляется описание критериев и методики их применения. В библиотеку

входят критерии для прогноза прочности СЧ, твёрдости СЧ, размыва, металлизированного пригара, прогноза структуры и свойств отливок, изготовленных из алюминиевых сплавов.

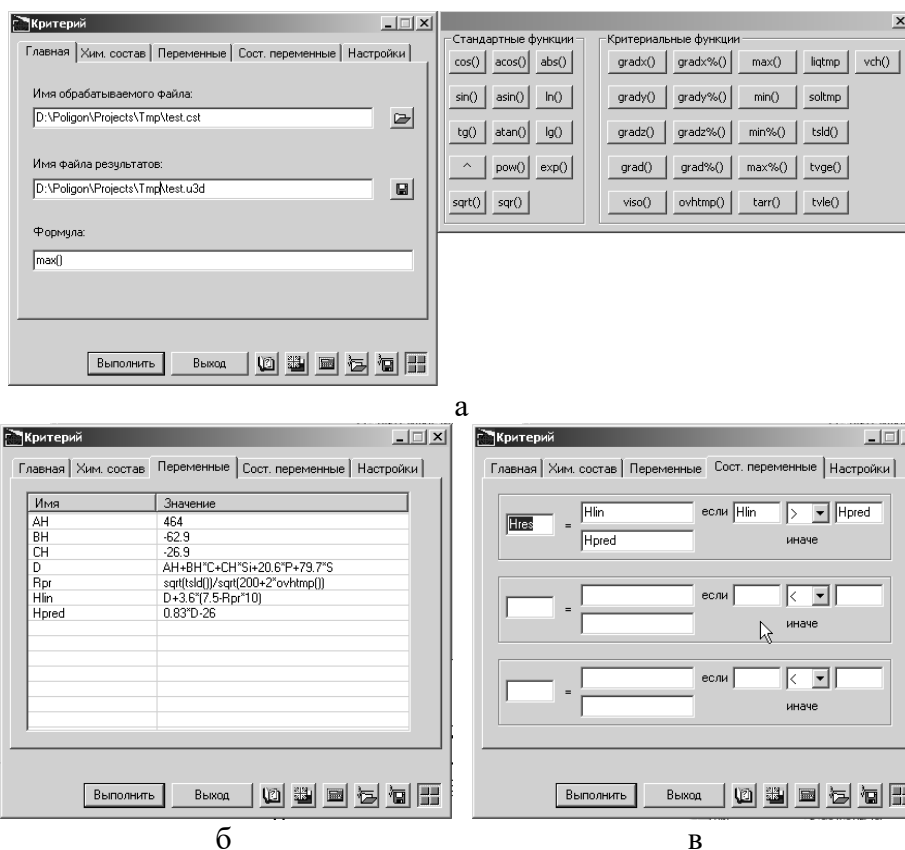


Рис. 2. Окно критериального модуля и его вкладки
а – вкладка «Главная» и дополнительная панель с переменными и функциями;
б – вкладка «Переменные»;
в – вкладка «Составные переменные»

В основе критериев «Прочность СЧ» и «Твёрдость СЧ», а также прогнозирующих структуру и свойства отливок из алюминиевых сплавов (см., например [1]) лежат эмпирические зависимости, устанавливающие связь искомой характеристики со скоростью охлаждения (рис. 3).

Полуэмпирические формулы критерия «Размыв» устанавливают связь между скоростью металла у поверхности раздела отливка-форма при заполнении полости формы и усилием, действующим на песчинку на этой границе раздела. На основании сравнения полученного усилия с прочностью смеси делается вывод о вероятности размыва (рис. 4).

Критерий «Металлизированный пригар» основан на аналитических формулах. Анализ механизма возникновения металлизированного пригара [2, 3] позволяет выдвинуть три условия, при одновременном выполнении которых возможно возникновение этого дефекта литья: превышение капиллярного противодавления со стороны формы (1) при условии длительного существования жидкого металла у границы раздела металл-форма (2) и, одновременно, прогрева формы на некоторую глубину до температуры, при которой металл способен течь (3). Сформулированное правило требует критериальной обработки расчётных полей давлений в металле (расчёт давлений и запись в соответствующий файл производится «ПолигонСофт» при расчёте микропористости), полей жидкой фазы в металле и температур в форме, что и производится посредством составленного критерия (рис. 5).

При составлении критерия, основанного на эмпирических формулах, фигурируют некоторые коэффициенты эмпирических формул, некоторые экспериментально

определённые константы процесса. На стадии адаптации того или иного критерия разумно корректировать эти коэффициенты, добиваясь, чтобы результат критериального анализа максимально приближался к реальности. Такой подход совершенно обоснован. Во-первых, используемые для составления критерия модели зачастую просты, значит, корректируя коэффициенты, мы подспудно учитываем то, что никак не описано математически в структуре критерия. Во-вторых, экспериментальное определение не всегда даёт точные значения, иногда условия эксперимента таковы, что отличаются от реального процесса литья, не говоря уже о том, что в условиях литейного производства достаточно сложно учесть все случайные факторы, которые могут повлиять на качество отливки при заливке в литейном цеху. Эмпирическая формула сама по себе может быть ценна тем, что в неявном виде заключает в себе некоторое правило, отражающее закономерность протекания процесса. Коэффициенты при этом могут быть объектом «тонкой настройки». Адаптация критерия к конкретному литейному производству – это необходимое условие точного критериального прогноза на основе моделирования базовых литейных процессов.

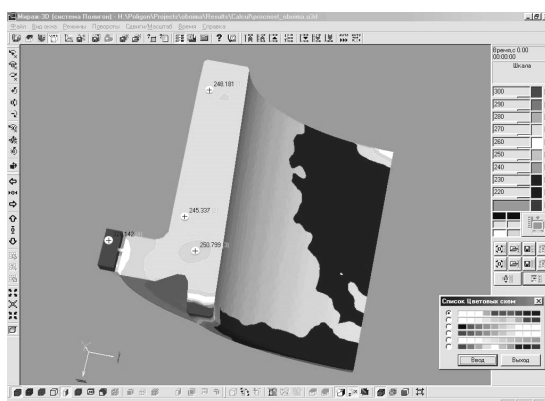


Рис. 3. Поля прочности (МПа) в теле отливки из чугуна

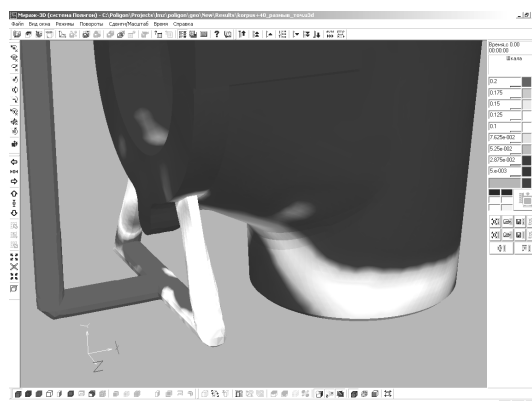


Рис. 4. Прогноз склонности к размыву литейной формы

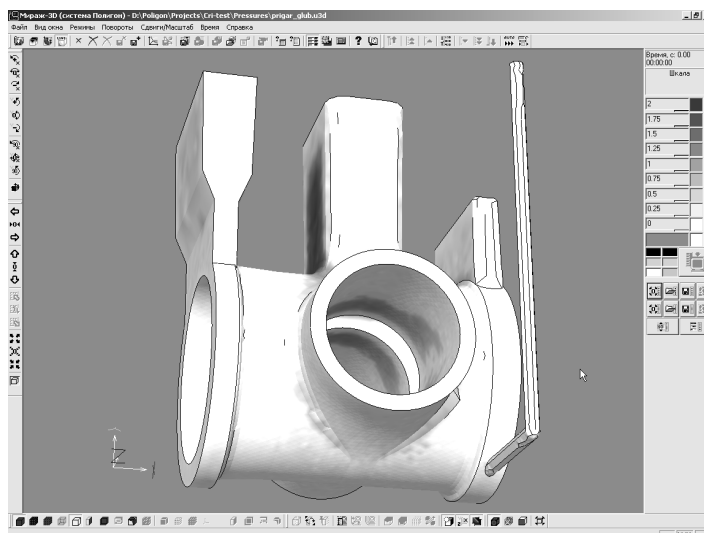


Рис. 5. Места на поверхности отливки, в которых вероятно появление металлизированного пригара (с указанием глубины, мм)

Необходимо отметить тот факт, что в современных СКМ ЛП зачастую задачи о прогнозе структуры, механических свойств и др. решается именно на уровне использования некоторых относительно несложных критериев. Крайне важно, чтобы у пользователя была полная информация о применяемом в том или другом случае критерии и возможность изменять этот критерий, редактировать коэффициенты, встречающиеся в

формулах критерия. Если нет такой возможности, то вставленный в СКМ критерий будет правильно работать только в тех конкретных и достаточно узких условиях, для которых разработчики определили эмпирические коэффициенты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эллиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
2. Голод В.М., Корнюшкин О.А. Теория литейной формы. Механика и теплофизика. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 108 с.
3. Валисовский И.В. Пригар на отливках. М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.