

The results of theoretical analysis of the hardening process in thin walled half-finished products using programmes "Poligon" and "ProCast" are presented in this article.

А. Н. КРУТИЛИН, БНТУ, В. Л. АКУЛИЧ, СООО «Микроэкспресс»,
А. И. СТАНЮК, БНТУ, К. В. ЩЕРБАК, РУП «МТЗ», А. А. ЧУЯНОВ, БНТУ

УДК 621.742.08

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ В ПЕСЧАНОЙ ФОРМЕ

Теоретическому исследованию вопросов, связанных с закономерностями формирования заготовок при литье в песчаные формы, посвящено достаточно большое количество работ. Решение задач по кинетике затвердевания сопряжено со значительными трудностями ввиду сложного характера теплообмена. При расчете процесса теплообмена необходимо учитывать отвод теплоты перегрева и выделение теплоты кристаллизации расплава в процессе литья. Теплота перегрева наиболее интенсивно отводится в начальной стадии процесса, когда температура расплава и интенсивность охлаждения отливки наибольшие. Нелинейный вид дифференциальных уравнений, описывающих процесс, вызывает необходимость использования приближенных методов расчета.

Основная задача моделирования состоит в том, чтобы на основе всестороннего анализа факторов, оказывающих влияние на процесс формирования отливки, предварительно определить оптимальные технологические параметры процесса для получения высококачественных бездефектных литых заготовок.

Для проведения предварительного теоретического анализа использовали профессиональную американско-швейцарскую систему компьютерного моделирования литейных процессов "ProCast". Модуль теплового расчета "ProCast" Base License позволяет рассчитывать выделение скрытой теплоты кристаллизации энтальпийным методом с учетом задаваемого спектра выделения твердой фазы, что дает возможность адекватно рассчитывать затвердевание для различных сплавов и способов литья.

Пакет позволяет проводить расчет системы трех дифференциальных уравнений: Фурье — Кирхгофа, учитывающего совместный перенос тепла теплопроводностью и конвекцией, неразрывности (сплошности) и уравнения движения Навье-Стокса в трехмерном варианте.

В рамках теплового расчета возможно моделирование процессов образования микро- и макропористости.

Процесс литья осуществляли методом погружения формы, изготовленной из жидкостекольной смеси, в расплав. Основными факторами, оказывающими влияние на стабильность процесса и качество получаемых заготовок, являются температура расплава и формы, ее размеры.

В качестве объекта для проведения расчетов выбрано кольцо из серого чугуна $d_{\text{н}}=110$ мм, $d_{\text{вн}}=100$ мм, $\delta=3$ мм.

Основное требование, предъявляемое к заготовкам, — получение необходимой структуры чугуна твердостью 96–114 HRB и равномерностью ее по периметру заготовки. Очевидно, что в области температур выше 900°C необходимо снижение интенсивности охлаждения заготовки для того, чтобы исключить затвердевание расплава в процессе заполнения формы и образование отбела в структуре чугуна. Интенсивность охлаждения заготовки, с одной стороны, должна быть минимальной, с другой — полное затвердевание заготовки необходимо обеспечить в течение 4–8 с, в противном случае форма, находящаяся в расплаве, может разрушиться.

На первом этапе проведен анализ влияния толщины формы на процесс затвердевания отливки. На рис. 1, 2 показаны расчетная зависимость изменения энтальпии и принятое изменение количества твердой фазы в зависимости от температуры расплава. Расчеты проведены для форм толщиной стенки 3, 5 и 10 мм при температуре расплава 1380°C в двух сечениях отливки: напротив питателя и под углом 90°. Анализ кинетики затвердевания показывает, что при температуре заливки 1380°C время затвердевания заготовки диаметром 110 мм в форме толщиной 3 мм составляет ~11с, для форм толщиной стенки 5 и

10 мм – 9,5 и 8,5 с соответственно. С увеличением толщины стенки формы от 5 до 10 мм время начала затвердевания практически одинаково и составляет ~2,1 с. Если сопоставить это время со временем заполнения формы (~0,3 с), можно сказать, что в процессе заполнения формы затвердевание металла не происходит. Предварительные эксперименты,

проведенные в лабораторных условиях, показали, что при толщине формы 3 мм очень часто имеют место случаи разрушения стержней в процессе заполнения формы расплавом. Использование форм толщиной стенки 10 мм экономически нецелесообразно. В связи с этим все дальнейшие расчеты и эксперименты проведены для форм толщиной стенки 5 мм.

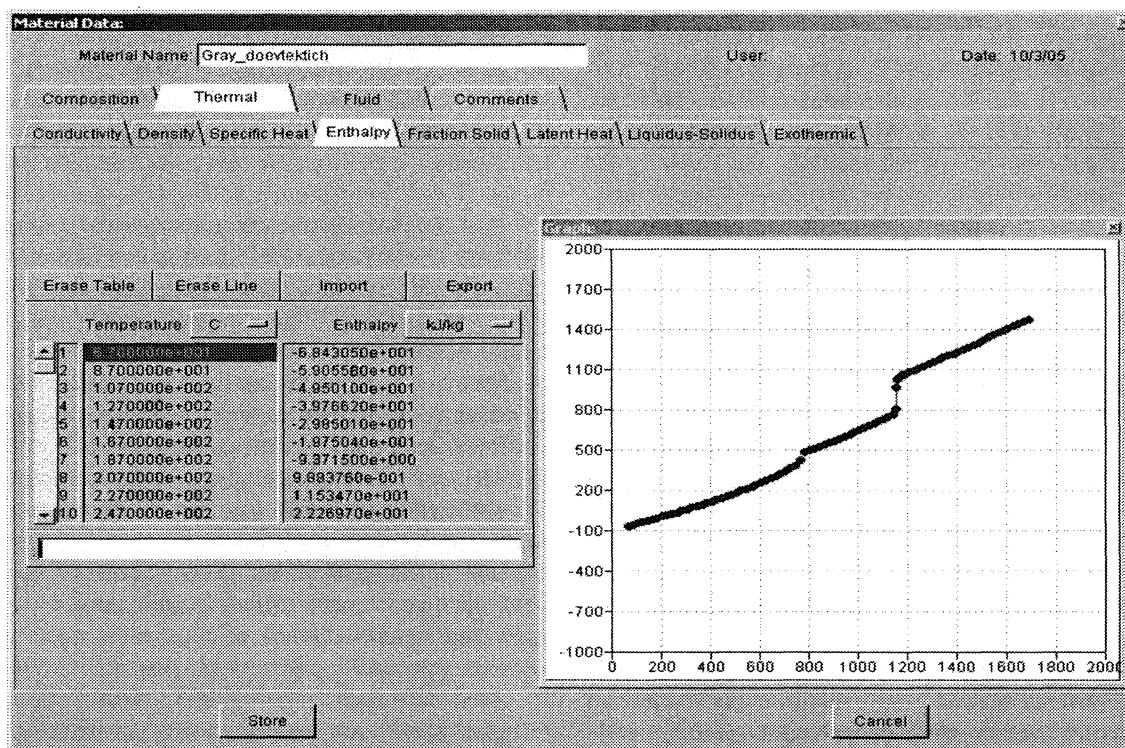


Рис. 1. Расчетная зависимость изменения энтальпии

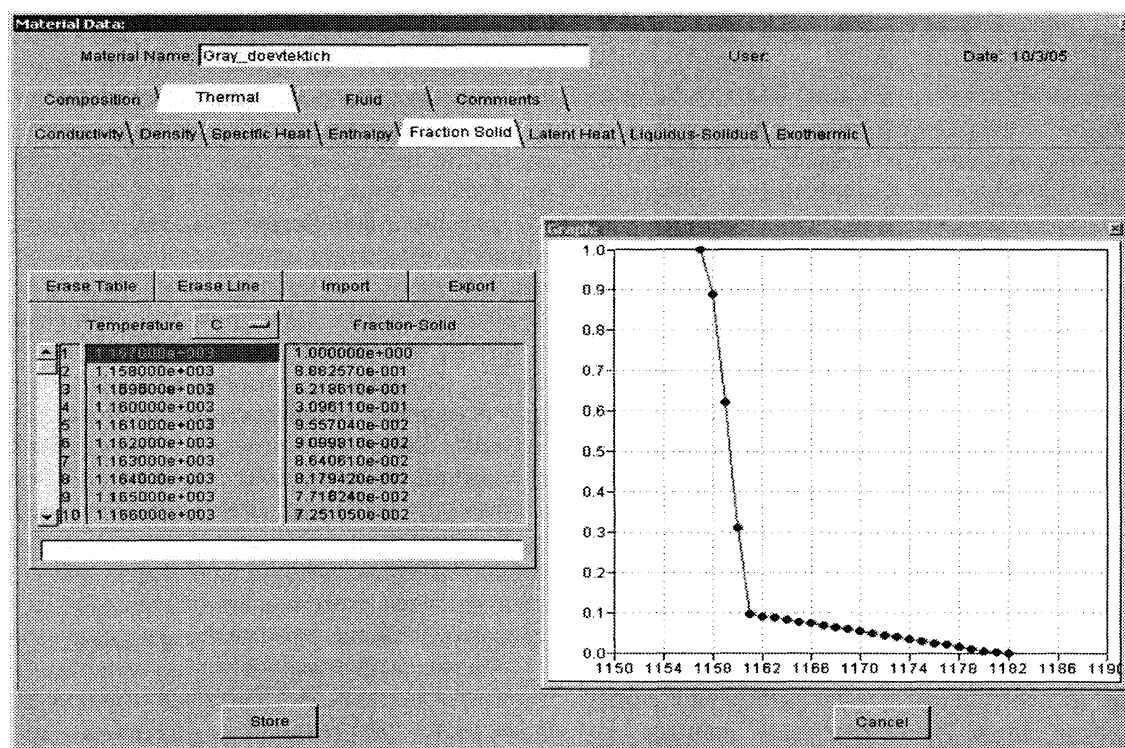


Рис. 2. Изменение количества твердой фазы в зависимости от температуры расплава

С точки зрения снижения возможности образования отбела и получения заготовок с равномерной твердостью по периметру представляет интерес предварительный нагрев формы. Расчеты проводили для четырех значений температуры формы: 20, 200, 400 и 600 °С. Температура расплава – 1380 °С. Нагрев формы в пределах от 20 до 200 °С практически не оказывает влияния на время полного затвердевания заготовки. Для 20 °С время затвердевания составляет 9,5 с, а для 200 °С – 11,5 с. Дальнейшее повышение температуры формы ведет к значительному увеличению продолжительности затвердевания. Так, при температуре формы 400 °С время затвердевания увеличивается до 16 с, а при 600 °С – до 22 с, т. е. более чем в 2 раза по сравнению с ненагретой формой.

С увеличением температуры расплава (температура формы 20 °С) время полного затвердевания изменяется незначительно: с 8,4 с при температуре 1320 °С до 9,7 с при температуре 1380 °С. Аналогичные результаты получены и при температуре формы 600 °С. Так, например, при температуре расплава 1320 °С время полного затвердевания составляет 19 с, с увеличением температуры до 1380 °С – ~22 с, в процентном соотношении разница составляет 8,7%.

Экспериментальная проверка полученных результатов показала, что при температуре заливаемого металла 1360–1380 °С и температуре формы 20, 200 °С имеет место значительное расхождение экспериментальных кривых затвердевания с данными, полученными расчетом в программе “ProCast”. С увеличением температуры формы до 400–600 °С ошибка еще более возрастает, расчетные данные почти в 4 раза больше экспериментальных.

Существующая точка зрения, что с помощью компьютерного проектирования можно абсолютно точно учесть влияние всех технологических параметров на характер протекающих процессов при затвердевании заготовок, недостаточно корректна. Необходимо хорошо представлять реальную картину моделируемого процесса, знать какие модели и алгоритмы используются в системе. Для достижения этого нужно, чтобы анализ результатов проводили специалисты высокой квалификации в области теории формирования отливки. Определить, что вносит наибольший вклад в расчетную ошибку достаточно трудно. Вероятно, это связано с неправильностью учета величины выделяющейся скрытой теплоты в интервале температур затвердевания.

Наиболее простым является метод эффективного подъема температур в соответствии с энтальпией. На первом этапе рассчитывают энтальпию для каждого узла сетки (метод конечных элементов) и далее по полученным данным изменения количества твердой фазы вычисляют температуры с учетом тепловыделения. Метод

позволяет эффективно учитывать тепловыделения в широких интервалах и при постоянных температурах.

Скрытую теплоту и характер ее выделения считают постоянными в случае, если существует однозначная зависимость тепловыделения от количества твердой фазы в широком интервале скоростей охлаждения (алюминиевые сплавы, большинство видов сталей).

Для чугунов следует формулировать модель учета абсолютного количества выделяющейся теплоты от параметров затвердевания и кристаллизации, так как эта величина зависит от хода охлаждения [1]. Использование в расчетах усредненных значений общей теплоты кристаллизации без учета соотношения количеств образующихся фаз вносит существенную погрешность в получаемые результаты. В случае неравновесной кристаллизации структура чугуна в конкретной отливке неизвестна и зависит от образующейся структуры (аустенито-графитной или ледебуритной). Кроме того, кристаллизационные параметры сплава зависят от состава чугуна, природы шихтовых материалов, условий выплавки, рафинирования, модифицирования расплава и т.д.

Связывание количества твердой фазы с диаграммами состояния сплавов неадекватно отражает характер тепловыделения для реальных неравновесных условий кристаллизации.

Использование понятия мощности внутренних источников теплоты для учета выделения скрытой теплоты возможно в случае небольших скоростей охлаждения для сплавов с большим интервалом кристаллизации при постоянном темпе выделения твердой фазы. Так как зависимость тепловыделения во времени неизвестна, использование этого способа нерационально.

Для приближенных расчетов при литье в песчаные формы усредненный коэффициент теплопередачи между отливкой и формой принимают равным 1000 Вт/(м²·К). Наибольшую достоверность обеспечивает экспериментальное определение спектра тепловыделения, которое можно получить путем пересчета на тепловыделение опытной температурной кривой специальной пробы [2]. Применительно к тонкостенным заготовкам получение экспериментальной температурной кривой достаточно трудно. Если использовать традиционную методику записи температурной кривой с помощью термопар, на результаты экспериментов большое влияние оказывает не только инерционность термопары, но и в большей степени влияние самой термопары на процесс кристаллизации заготовки.

Метод эффективной теплоемкости, в котором материалу сплава приписывают переменную теплоемкость, эффективно использовать в условиях высоких скоростей кристаллизации расплавов, при отсутствии эвтектических площадок, вероят-

но, этот метод больше подходит для расчетов процесса затвердевания тонкостенных заготовок из чугуна.

Учитывая трудности, связанные с использованием лицензионного пакета “ProCast”, а также основываясь на результатах предварительных расчетов и экспериментальных данных, разработана программа расчета, выполненная на основе метода конечных разностей (МКР). Данный метод уступает по точности методу конечных элементов (МКЭ), так как последний более адекватно описывает геометрию расчетной области. Однако, учитывая малый шаг по маршевой координате, геометрию кольца можно достаточно точно описать в виде набора параллелепипедов, полученных наложением непрерывной прямоугольной ортогональной сетки на прямоугольную расчетную область, в которую вписана геометрия отливки и формы, задачу проще решать классическим МКР. Погрешность МКР при наличии границ зависит от потоков через эти границы, т.е. от того, насколько велик разрыв функции на границе. Применительно к данной технологии этот разрыв относительно невелик, так как используется малотеплопроводная песчаная форма и при нагреве ее формы распределение температуры в системе “отливка–форма” приближается к непрерывному, без существенного скачка на границе между отливкой и формой.

Характерной особенностью заполнения тонкостенных заготовок является быстрая потеря расплавом теплоты перегрева. Вследствие теплового взаимодействия со стенками формы происходит рост твердой корки на внутренней поверхности формы и разогрев формы потоком расплава, что оказывает существенное влияние на время и скорость затвердевания, а также на скорость охлаждения отливки. Распределение твердой фазы в потоке зависит от величины начального напора, характера изменения и величины тепловой активности формы, кинетики изменения напора.

Процессы теплопередачи неразрывно связаны с условиями движения жидкости. Перенос теплоты в направлении нормали к стенке при ламинарном режиме движения в основном осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном режиме такой способ переноса теплоты сохраняется лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра большое влияние оказывает конвекция. При литье тонкостенных заготовок градиент температур между отливкой и формой достаточно высок, в этих условиях затвердевание происходит практически без конвективного движения расплава.

Учитывая, что процесс заполнения происходит за доли секунды, при разработке

программы принято решение не принимать во внимание гидродинамические процессы.

Для вычисления динамики изменения температур необходимо задать начальные и граничные условия распределения температур. При решении задачи использовали граничные условия 3-го рода.

Исходные данные для расчета: материал заготовки – серый низколегированный чугун. Химический состав: С – 3,7%; Si – 2,7; Mn – 0,5; P – 0,02; S<0,05%. Теплофизические параметры данного чугуна приняты следующие: $\lambda=31,6$ Вт/(м·К), $c=655$ Дж/(кг·К), $\rho=7200$ кг/м³. Форму изготавливали из жидкостекольной смеси, теплофизические свойства которой: $\lambda=0,785$ Вт/(м·К), $c=1060$ Дж/(кг·К), $\rho=1600$ кг/м³ [3].

На рис. 3 представлены расчетные (по упрощенной программе) и экспериментальные данные процесса затвердевания заготовки при температуре заливки расплава 1380°C в зависимости от температуры формы. Для сопоставления на рис. 4 приведены расчетные данные, полученные в системе “ProCast”.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал достаточно хорошее их совпадение. Некоторое расхождение, возможно, связано с принятыми теплофизическими характеристиками.

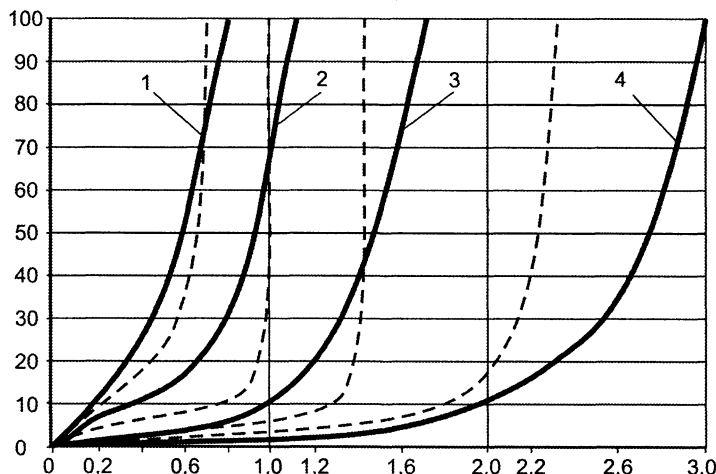


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости процесса затвердевания заготовки: — — — упрощенная программа расчета; — — — экспериментальные данные; 1 – 20°C; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600°C

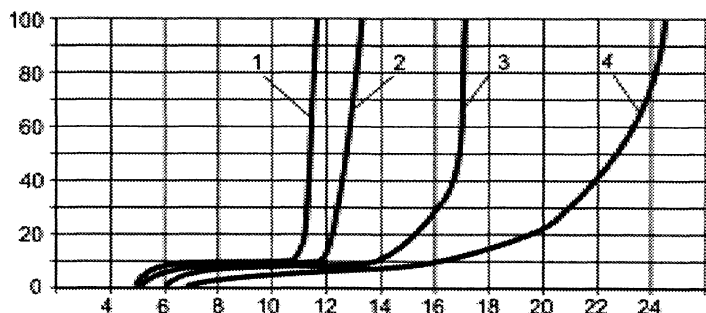


Рис. 4. Затвердевание заготовки в системе “ProCast” в зависимости от температуры формы при температуре металла 1360°C: 1 – $T_{\phi}=20$ °C; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600°C

Таким образом, расчеты, проведенные с помощью пакета "ProCast" и по упрощенной программе, показали, что основным фактором, оказывающим влияние на кинетику процесса затвердевания тонкостенных заготовок поршневых колец, является температура формы. Влияние температуры заливаемого расплава носит второстепенный характер.

Сведения о математических моделях, используемых в "ProCast" для расчета образования микро- и макропористости, в литературе отсутствуют. Для сопоставления расчет образования пористости провели как с помощью программы "ProCast", так и в системе автоматизированного моделирования литейных процессов "Полигон". Один из разработчиков системы "Полигон" М.Д.Тихомиров считает, что ни в одной системе моделирования литейных процессов, кроме "Полигон", усадочная задача не решается на основе современных физических моделей. В большинстве случаев для расчетов усадочных дефектов используют относительно простые критерии, типа критерия Наймы, либо проводят упрощенный расчет макропористости или раковин без учета фильтрационных процессов и сложной структурированности двухфазной зоны. Для сплавов с ярко выраженными процессами объемного расширения образование пористости связывают с совместным течением процессов затвердевания, кристаллизации и деформации. В системе "Полигон" учитывают два различных механизма образования усадочных дефектов: образование макропористости и раковин, второй механизм – образование микропористости. Образование макропористости связывают с недостатком необходимого объема металла, находящегося выше зеркала расплава, который идет на компенсацию усадки. В зависимости от объема жидкого металла и "структурированности" той области, которая находится выше зеркала, пористость образуется либо по принципу "вытекания" жидкого металла, либо по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала расплава, наиболее точные данные дает решение дифференциального уравнения фильтрационного течения. Причем важно отметить, что

задачи по микро- и макропористости следует решать совместно, так как они оказывают влияние друг на друга. Для моделирования образования микропористости необходимо экспериментальное определение фильтрационных характеристик, на величину которых существенное влияние оказывают процессы рафинирования, модифицирования и т.д. [4]. Для традиционных способов литья тонкостенных заготовок пористость является одним из основных видов брака. Проведенное моделирование как в системе "ProCast", так и "Полигон" показало отсутствие пористости в литых заготовках во всем диапазоне исследованных технологических параметров литья. Моделирование проведено не только для серых чугунов с пластинчатой формой графита, но и для высокопрочных чугунов доэвтектического, эвтектического и заэвтектического состава.

На основании проведенного моделирования можно сказать, что либо существующие математические модели не позволяют учесть все факторы, оказывающие влияние на образование пористости, либо основную причину образования пористости необходимо связывать с влиянием формовочных материалов, используемых в технологическом процессе.

Таким образом, основываясь на результатах моделирования процесса литья и предварительных экспериментальных данных, можно отметить, что оптимальными технологическими параметрами литья является температура заливаемого расплава 1360–1380°C при температуре формы 400–600°C.

Литература

1. Голод В.М., Дьяченко С.А. Численный расчет затвердевания чугунных отливок // Кристаллизация. Теория и эксперимент. Ижевск: УдГУ, 1987. С. 26–33.
2. Голод В.М., Нехедзи Ю.А. Определение некоторых теплофизических свойств сплавов по кривым охлаждения // Теплообмен между отливкой и формой. Мн.: Выш. шк., 1967. С. 179–183.
3. Есьман Р.И., Бахмат В.А., Королев В.М. Теплофизика литейных процессов. Мн.: Беларуская навука, 1998.
4. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача // Литейное производство. 2001. №12. С. 27–29.