

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА РАСПЛАВ - ПРОТИВОПРИГАРНОЕ ПОКРЫТИЕ - ФОРМА

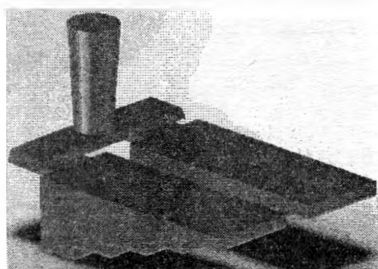
Процессы, протекающие на границе раздела расплав–форма («р–ф») и расплав–противопригарное покрытие–форма («р–п–ф») очень сложны и разнообразны. Попытки их описания разными авторами зачастую носят эмпирический характер и основаны на экспериментальных данных, полученных для конкретных случаев технологии производства отливки. В современных условиях, когда широкое распространение и доступность получили информационные технологии (системы автоматизированного проектирования (САД), системы инженерного анализа (САЕ)), не составляет особого труда промоделировать процессы в зоне контакта «р–ф» и «р–п–ф».

Целью такого моделирования является выявление динамики изменения температуры на границе раздела «р–ф» и «р–п–ф» как в момент заливки формы расплавом, так и в период кристаллизации расплава. Как отмечено в [1], одним из основных критериев, характеризующих условия образования поверхностных дефектов отливок, является распределение температуры в зоне контакта отливки с формой. Поэтому анализ процессов теплообмена в такой зоне является важной задачей, решение которой позволяет не только правильно подобрать противопригарное покрытие, но и спрогнозировать будущее качество отливки.

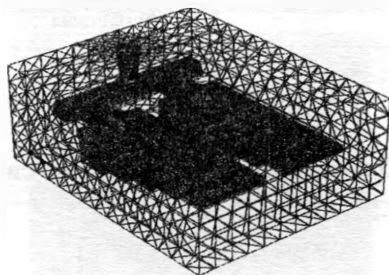
В настоящей работе в качестве инструмента, позволяющего выполнить расчеты и получить визуальную картину процессов, протекающих на границе раздела «р–ф» и «р–п–ф», и, как результат, оценить вероятности образования поверхностных дефектов отливок, использована система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт».

Работа с системой СКМ ЛП построена по модульному принципу и отличается простотой выполнения операций по заданию граничных (ГУ) и начальных (НУ) условий, выполнению расчетов и

анализу полученных результатов. Моделирование процессов на границе раздела «р-ф» и «р-п-ф» выполнено для ступенчатой технологической пробы (рис. 1). Толщина стенки отливки изменяется от 10 до 50 мм. Трехмерная модель литейной формы в сборе и отливки построена в среде SolidWorks, генерация конечно-элементной сетки выполнена в COSMOSDesignSTAR.



а)



б)

а – 3D модель отливки с литниково-питающей системой, б – литейная форма в сборе с конечно-элементной сеткой

Рисунок 1 – Технологическая ступенчатая проба для изучения процессов пригаобразования

Отливка «ступенчатая проба» изготавливается из чугуна СЧ 20, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав чугуна

Элемент	C	Si	Mn	S	P
Содержание, %	3,40	1,60	0,80	0,08	0,12

Этот сплав обладает свойствами, приведенными в таблице 2 [2].

Таблица 2 – Теплофизические свойства сплава

Теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплота затвердевания, Дж/кг	$T_{лик}$	$T_{сол}$	$\Delta T_{кр}$
			°С		
5094	39,87 – 119,62	245000	1193,6	1160,6	33

Заливка расплава производится в литейную форму из холоднотвердеющей песчано-смоляной смеси, отверждаемой в присутствии кислотного катализатора (табл. 3, 4).

Таблица 3 – Состав формовочной смеси

Компонент	Смола карбамидно-фурановая	Катализатор	Кварцевый формовочный песок марки 1К ₁ О ₂
К-во, %	2	1	остальное

Таблица 4 – Теплофизические свойства формовочной смеси

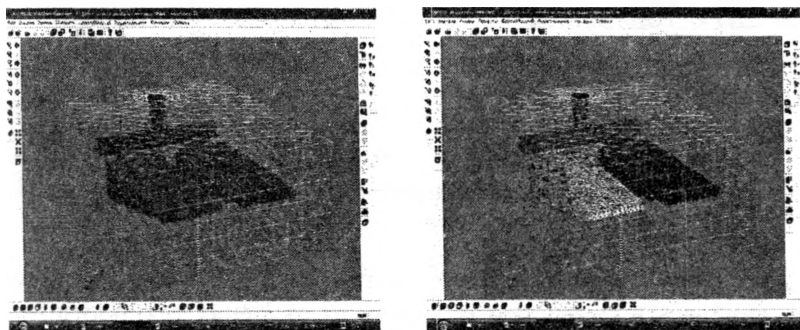
Теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1370–1370,4	0,5–0,55

Для изучения влияния различных противопригарных покрытий на процесс теплообмена на границе раздела «р–п–ф» в одной литейной форме моделируется изготовление двух отливок. В эксперименте 1 одна часть литейной формы окрашена противопригарным покрытием на основе дистен-силлиманита, вторая – противопригарным покрытием на основе графита (табл. 5). В эксперименте 2 одна часть литейной формы без покрытия, вторая окрашена теплопроводящим покрытием на основе теллура [3].

Таблица 5 – Свойства противопригарных покрытий

Покрытие	Свойства		
	Толщина слоя δ, мм	Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	Степень черноты ε, %
На основе дистен-силлиманита	1	0,175	56
На основе графита	1	0,379	97
На основе теллура	1	1,53	73

Расчет включал в себя подготовку сеточной модели расчетной области в предпроцессоре «Мастер-3D». Этот модуль позволяет проанализировать качество конечно-элементной сетки и при необходимости внести корректировки, сориентировать модель относительно вектора силы тяжести, присвоить отдельным элементам тип «отливка/форма» и задать индексы объемов и границ (рис. 2).

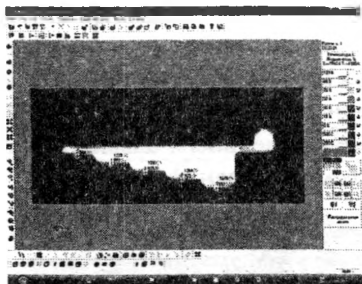


а) *б)*
а – режим визуализации индексов границ, *б* – режим визуализации индексов объемов

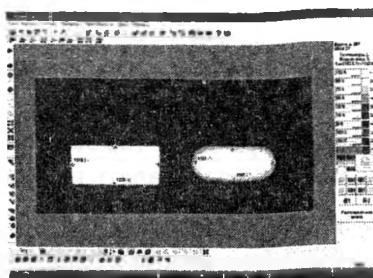
Рисунок 2 – Подготовка модели в предпроцессоре «Мастер-3D»

Определение ГУ и НУ выполняется в предпроцессоре «Сплав». Каждый пункт головного меню этого модуля позволяет создавать и редактировать тот или иной файл исходных данных, который необходим для выполнения расчетов. Следует отметить, что обязательными для обеспечения расчетов являются файлы «Тепловые свойства сплава», «Свойства материалов формы» и «Параметры теплопередачи» [2]. Влияние противоположных покрытий на теплообмен между отливкой и формой осуществляется заданием ГУ параметров теплопередачи.

Расчет процессов гидродинамики заполнения формы и кристаллизации расплава выполнен в процессорных модулях «Эйлер-3D» и «Фурье-3D» соответственно. Визуализировать картину расчетов и получить численные значения распределения скоростей движения расплава, температур, давлений и усадочных дефектов позволяет модуль «Мираж-3D» (рис. 3).



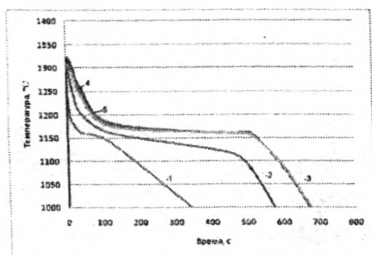
а)



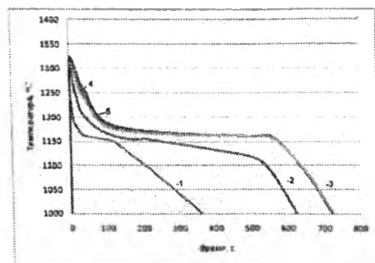
б)

а – продольное сечение формы, б – поперечное сечение формы
 Рисунок 3 – Распределение температуры в отливке и форме в процессе кристаллизации

Динамика изменения температуры в процессе кристаллизации отслеживалась в контрольных точках на ступенях технологической пробы как в отливке, так и в форме (толщина стенки отливки изменяется от 10 до 50 мм). Для случая неокрашенной формы и покрытия на основе теллура значения температуры показаны для контрольной точки 5 при толщине стенки отливки 50мм (рис. 4, 5, 6).



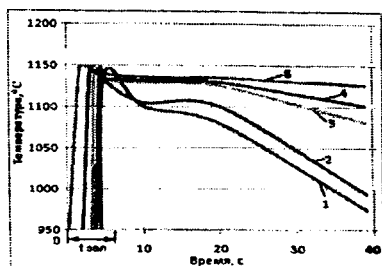
а)



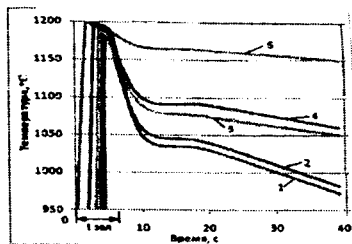
б)

а – противопожарное покрытие на основе дистен-силлиманита, б –
 противопожарное покрытие на основе графита,
 1, 2, 3, 4, 5 – изменение температуры в контрольных точках с толщиной
 стенки отливки 10, 20, 30, 40, 50мм соответственно

Рисунок 4 – Динамика изменения температуры в отливке



а)



б)

а – противопопригарное покрытие на основе дистен-силлиманита, б –
 противопопригарное покрытие на основе графита,
 1, 2, 3, 4, 5 – изменение температуры в контрольных точках с толщиной
 стенки отливки 10, 20, 30, 40, 50мм соответственно

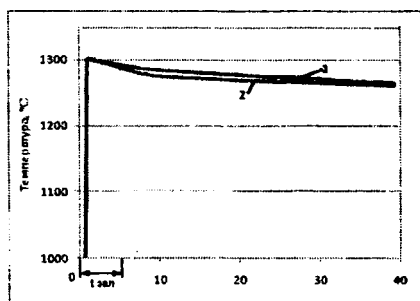
Рисунок 5 – Динамика изменения температуры в форме

Расчет процесса кристаллизации расплава показал, что сразу после заливки температура расплава падает в начальный период стремительно, а затем скорость охлаждения снижается. Так, температура отливки в форме, окрашенной противопопригарным покрытием на основе графита, в контрольных точках падает до 1000°C через 340 (кривая 1), 580 (кривая 2), 695 (для кривых 3, 4, 5) секунд, в то время как в форме, окрашенной противопопригарным покрытием на основе дистен-силлиманита, температура падает до того же значения за 385, 615 и 720 с соответственно (рис. 4). Таким образом, через противопопригарное покрытие на основе графита идет более интенсивный теплоотвод от отливки, чем через противопопригарное покрытие на основе дистен-силлиманита, что подтверждает разницу теплофизических свойств покрытий.

Из рисунка 5 видно, что противопопригарные покрытия оказывают разное влияние на изменение температуры в форме. Материал формы, окрашенный противопопригарным покрытием на основе графита, при заливке формы расплавом быстро нагревается до более высоких температур, чем аналогичный участок формы с покрытием на основе дистен-силлиманита. В контрольной точке при толщине стенки 50 мм максимум температуры достигает 1196°C. В части формы, окрашенной дистен-силлиманитовым покрытием, также наблюдается скачкообразный рост температуры, однако максимум

температуры формы с покрытием не превышает 1148°C , что меньше температуры $T_{\text{сол}}=1160,6^{\circ}\text{C}$ расплава. А именно это является основным условием предотвращения пригара на поверхности отливки при использовании дистен-силлиманитового противопригарного покрытия [1].

В случае с теплопроводящим покрытием на основе теллура температура поверхности формы достигает более высоких значений, чем с теплоизолирующими покрытиями, однако такой рост температуры наблюдается и в неокрашенной форме (рис. 6). Таким образом, возникает вопрос о необходимости объяснения отбеливающего действия теллурического покрытия, в том случае если условия интенсивного теплоотвода в литейной форме из холоднотвердеющей песчано-смоляной смеси не созданы. Решение этой задачи может быть получено при изучении процессов микролегирования. То есть на границе расплав–теллурическое покрытие–форма создаются температурные условия, обеспечивающие диффузию теллура в приграничные слои отливки. Известно, что теллур и висмут, при использовании их как легирующих элементов, обладают сильным отбеливающим действием. В работе [4] отмечается, что теллурическое покрытие, нанесенное на поверхность формы, вызывает сильный пригар. Такое явление можно объяснить пропитыванием пор формовочной смеси жидким расплавом, для чего на границе раздела



1 – литейная форма, 2 – покрытие на основе теллура

Рисунок 6 – Динамика изменения температуры в форме

созданы все условия: во-первых, температура поверхности формы достаточно высока (1298°C) (рис. 6); во-вторых, чугун, легированный теллурическим покрытием, имеет пониженную температуру плавления по сравнению с серым, поэтому при температуре заливки 1320°C он сильно перегрет и жидкотекуч. Кроме того, серый чугун, легированный теллурическим покрытием, активно смачивает зерна кварцевого песка. Для предотвращения пригара рекомендуется наносить теллури-

вое покрытие на поверхность, предварительно нанесенного, теплоизоляционного покрытия, например на основе дистен-силлиманита.

Таким образом, результаты исследований позволяют констатировать не только возможность моделирования с помощью «ПолигонСофт» тепловых процессов на границе раздела «р–п–ф», но также осуществлять выбор противопригарных покрытий и прогнозировать качество поверхности отливки.

Литература

1. **Валисовский, И. В.** Пригар на отливках / И. В. Валисовский. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.
2. **Справочная система СКМ ЛП «ПолигонСофт».** – С Пб., 2007.–320 с.
3. **Каталог материалов** фирмы «Huttenes-Albertus». – Dusseldorf, 2006. – 21 с.
4. **Сварика, А. А.** Покрытия литейных форм / А. А Сварика. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.

УДК 621.74

В.А. ПУМПУР, канд. техн. наук,
В.М. ИЛЬЮШЕНКО, канд. техн. наук,
Г.П. КОРОТКИН, канд. техн. наук,
В.П. ДОЙЛИДОВ (ИТМ НАН Беларуси)

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ЦИНКОВЫХ АНОДОВ

Горячекатаные цинковые аноды, получаемые методом литья в кокиль путем заливки расплава через дождевую литниковую систему, нашли широкое применение для электрохимического нанесения цинковых покрытий в машиностроении [1]. Целью настоящего исследования является минимизация энергозатрат при изготовлении горячекатаных цинковых анодов по разработанной в ИТМ НАН Бе-