

В. А. Мамишев, О. И. Шинский, Л. А. Соколовская
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК РАЗНОЙ МАССЫ И НАЗНАЧЕНИЯ

Выявлены особенности пространственно-временной эволюции температурных полей в процессе затвердевания разных заготовок (слитков и отливок) для повышения их качества.

Ключевые слова: литея заготовка, затвердевание, температурное поле.

Виявлено особливості просторово-часової еволюції температурних полів в процесі тверднення різних заготовок (зливків та виливків) для підвищення їх якості.

Ключові слова: лита заготовка, тверднення, температурне поле.

It is revealed the peculiarities of distance-time evolution of the temperature fields in solidification process different billets (ingots and casts) for raise them quality.

Keywords: cast billets, solidification, a temperature field.

Первичная структура отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок разной массы и конфигурации формируется в период их затвердевания. В процессе затвердевания возникает большинство дефектов кристаллической структуры [1, 2]: усадочные раковины, газоусадочная пористость и рыхлость, дендритная микроликвация, внеосевая и осевая макроликвация, плены, неметаллические включения, кристаллизационные макро- и микротрещины. В итоге снижаются качество литых заготовок и уровень физико-механических свойств литого металла.

Для уменьшения количества литейных дефектов и повышения качества структуры литых заготовок необходимо оптимизировать температурный режим их затвердевания. Чтобы свести к минимуму отрицательное влияние дефектов литья на качество литого металла, целесообразно управлять [3-5] температурными полями в системах отливка-форма, слиток-изложница и заготовка-кристаллизатор с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл.

Для управления температурным состоянием литых заготовок разной массы и геометрии разработана математическая модель их затвердевания. В дифференциальных уравнениях (1), (2) этой модели учтена [6] кривизна k_F профиля поперечного сечения отливок, слитков и стенок литейной оснастки

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\lambda} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - k_F G_T - K_{\lambda\lambda} G_T^2 \right), \quad 0 < r < R_0^-; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\phi} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - k_F G_T - K_{\lambda\phi} G_T^2 \right), \quad R_0^+ < r < R_{\phi}; \quad (2)$$

где r – расстояние, м; t – время, с; T – температура, °С; G_T – градиент температуры, °С/м; $K_{\lambda\lambda}$, $K_{\lambda\phi}$ – коэффициенты прироста теплопроводности, K^{-1} .

В уравнениях нестационарного теплопереноса учтены [6, 7] температурные зависимости теплофизических свойств металлического сплава и формы, а также фазовые превращения в двухфазной зоне литой заготовки и в стенках замороженной песчаной формы. В эффективном коэффициенте температуропроводности a_{λ} за-

Затвердевание сплавов

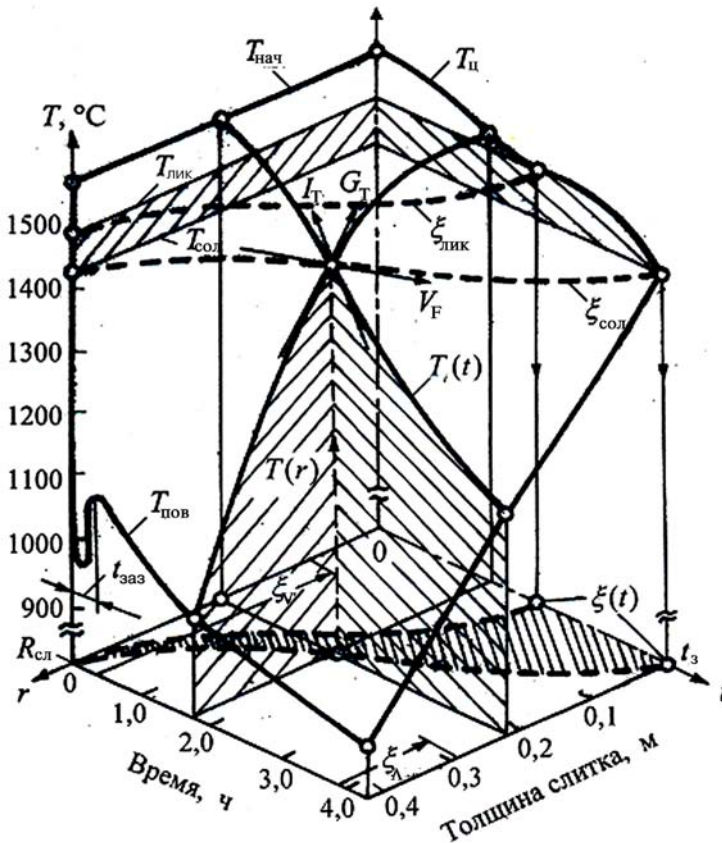
твердевающего расплава учтено выделение скрытой теплоты кристаллизации сплава в интервале температур ликвидус-солидус, а в эффективном коэффициенте температуропроводности стенок теплоаккумулирующей формы $a_{\text{ф}}$ - поглощение скрытых теплот плавления прослоек льда и испарения образующихся пленок воды.

При фазовых превращениях в стенках замороженной формы или стержня эффект теплопоглощения усиливается [5], что снижает разогрев литейной оснастки в процессе затвердевания заготовки. Поэтому теплоотвод от литой заготовки становится более интенсивным, что способствует ускорению процесса кристаллизации узко- и широкоинтервальных сплавов.

С целью компьютерного прогнозирования температурных полей при затвердевании заготовок разной массы и конфигурации разработан [7] конечно-разностный алгоритм явно-неявного типа для численного решения системы дифференциальных уравнений нестационарного теплопереноса с краевыми (начальными и граничными) условиями математической модели затвердевания.

Основные закономерности изменения температурных полей во времени и по толщине литых заготовок будем анализировать (рисунок) на примере расчета [3] процесса затвердевания стального кузнечного слитка массой 13,3 т эквивалентным диаметром 840 мм. На рисунке показана (в аксонометрии) пространственно-временная эволюция куполообразного температурного поля слитка от начала и до конца затвердевания в среднем по его высоте поперечном сечении.

С одной стороны, для характерных моментов затвердевания слитка (начало, конец и промежуточный момент затвердевания) в 3-х вертикальных плоскостях, расположенных параллельно оси координат $0r$ (рисунок), дано распределение температуры по радиусу слитка в виде изохрон температурного поля.



Прогнозирование кинетики затвердевания стального слитка по его температурному полю

Затвердевание сплавов

В начале затвердевания изохрона температурного поля $T_{нач}$ отражает равномерное распределение температуры расплава $T_{нач} = T_p$ в объеме слитка. В конце затвердевания изохрона температурного поля $T_{кон}$ изменяется по радиусу слитка практически линейно от температуры солидуса сплава $T_{сол}$ до температуры поверхности $T_{пов}$ полностью затвердевшего слитка.

В текущий момент затвердевания изохрона температурного поля $T_{тек}$ показывает распределение температуры в жидком ядре слитка (выше температуры ликвидуса $T_{лик}$), в двухфазной зоне кристаллизации сплава (между температурами ликвидуса $T_{лик}$ и солидуса $T_{сол}$) и в затвердевшем слое слитка (ниже температуры солидуса $T_{сол}$). В фиксированный момент времени t эта изохрона представлена сплошной кривой в промежуточной вертикальной плоскости “температура-расстояние”.

С другой стороны, на рисунке представлено изменение во времени температурного поля слитка в 3-х вертикальных плоскостях, расположенных параллельно друг другу в системе координат “температура-время”. Кривые охлаждения при разных значениях координаты r иллюстрируют нелинейный характер изменения во времени температуры на поверхности слитка, в центре его поперечного сечения и во внутренней точке слитка.

Кривая охлаждения поверхности слитка представлена в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси $0r$ при $r = R_{сл}$. Она имеет два экстремума: минимальную температуру в начальный момент образования газового зазора между твердой корочкой слитка и стенкой изложницы и максимальную температуру к моменту завершения процесса образования газового зазора в системе слиток-изложница. Эта кривая охлаждения отражает термоциклический характер изменения температуры поверхности затвердевающего слитка. При неблагоприятных условиях формирования твердой корочки (высокие градиенты температуры G_T и низкая пластичность стали при предсолидусных температурах) в слитке могут образоваться поверхностные трещины, имеющие термическую природу возникновения.

В осевой вертикальной плоскости, которая проходит через центр поперечного сечения слитка перпендикулярно оси $0r$ при $r = 0$, находится кривая охлаждения расплава от температуры разлива жидкой стали T_p до температуры ликвидуса $T_{лик}$ и далее до температуры солидуса $T_{сол}$ в интервале температур двухфазного состояния кристаллизующейся стали.

В промежуточной вертикальной плоскости, перпендикулярной оси $0r$ и пересекающей ее во внутренней точке r , расположена кривая охлаждения, которая отражает температурное и фазовое состояние затвердевающего слитка: между температурами T_p и $T_{лик}$ – перегретый расплав; между температурами $T_{лик}$ и $T_{сол}$ – двухфазная зона кристаллизации; ниже температуры $T_{сол}$ – затвердевший металл. Эта кривая охлаждения имеет монотонный (без экстремумов) характер изменения температуры во времени.

Если параллельно друг другу провести две горизонтальные плоскости, которые расположены перпендикулярно оси температуры и пересекают ее на уровнях $T = T_{лик}$ и $T = T_{сол}$, то каждая плоскость пересекает куполообразную поверхность температурного поля затвердевающего слитка, образуя фронт продвижения изотермы ликвидуса (фронт начала кристаллизации $\xi_{лик}$) и фронт продвижения изотермы солидуса (фронт конца кристаллизации $\xi_{сол}$).

В верхней части рисунка характер продвижения изотерм ликвидуса $\xi_{лик}$ и солидуса $\xi_{сол}$ изображен пунктирными линиями. Если обе кривые $\xi_{лик}$ и $\xi_{сол}$ спроектировать на горизонтальную плоскость $r0t$ основания рисунка, то в его нижней части получим две кинетические кривые затвердевания слитка в виде пунктирных линий продвижения фронтов ликвидуса и солидуса от поверхности к оси в поперечном сечении слитка.

Итак, в двух взаимно перпендикулярных вертикальных сечениях температурного поля, которые пересекают ось времени и радиус слитка при фиксированных значениях t и r , расположены изохрона температурного поля затвердевающего слитка и кривая охлаждения кристаллизующейся стали. В точке их пересечения на

Затвердевание сплавов

куполообразной криволинейной поверхности нестационарного температурного поля $T(r, t)$ проведем касательные в сторону возрастания температуры. С их помощью в любой точке поперечного сечения затвердевающего слитка вычисляются интенсивности (скорости) охлаждения I_T и градиенты температуры G_T как частные производные от температуры по времени и радиусу. Разделив интенсивность охлаж-

дения $I_T = \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{F_c}$ на градиент температуры $G_T = \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{F_c}$ при $r|_{F_c} = \xi_{\text{сол}}$, получим

$$\text{скорость затвердевания слитка } V_{\text{сол}} = \frac{I_T}{G_T} \Big|_{F_c} = \left(\frac{\partial T}{\partial t} / \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{F_c} = \frac{d\xi_{\text{сол}}}{dt}.$$

Для повышения скорости затвердевания слитков, непрерывнолитых заготовок и массивных отливок в жидкий металл вводят микрохолодильники, которые быстро снимают начальный перегрев расплава [8] и способствуют измельчению кристаллической структуры литого металла.

После затвердевания литых заготовок качество структуры улучшают деформацией литого металла, совмещенной с термической обработкой при прокатке слитков и непрерывнолитых заготовок и ковке кузнечных слитков, а также термической обработкой отливок без деформации литого металла, но с последующей механической обработкой рабочих поверхностей резанием для получения литых деталей точением, сверлением, строганием или фрезерованием.

Отрицательное влияние дефектов затвердевания стальных слитков и непрерывнолитых заготовок на прочностные и пластические свойства проката или поковок уменьшают их термомеханической обработкой. Однако, наружные слои слитков и непрерывнолитых заготовок при нагреве под прокатку или ковку могут превратиться в окалину. При этом возрастают потери наиболее более плотного металла коркового слоя заготовок, который защищает их глубинные слои от окисления при технологическом нагреве. Чтобы уменьшить окисление наружных слоев слитка и исключить окисление его внутренних слоев, применяют технологию безокислительного нагрева.

Дефекты затвердевания отливок снижают надежность и ресурс работы литых изделий. При термообработке отливок вредное влияние дефектов их кристаллического строения частично устраняется. Но при механической обработке резанием вскрываются внутренние дефекты литого металла (усадочные раковины, газовые поры и другие). Поэтому качество литых изделий после холодной обработки отливок резанием ниже по сравнению с качеством изделий, полученных горячей деформацией слитков при их прокатке или ковке.

Однако, существенное преимущество литых изделий в том, что их поверхностные слои с мелкокристаллической структурой литого металла обладают повышенным уровнем физико-механических свойств. Во многих случаях это гарантирует герметичность литых изделий, а также повышенную износостойкость и коррозионную стойкость их рабочих слоев в условиях эксплуатации. Чтобы минимизировать обработку рабочих поверхностей резанием, идут по пути повышения размерной точности отливок. С этой целью полезна термическая обработка поверхностных слоев отливок еще на стадии их затвердевания и охлаждения в литейной форме.



Список литературы

1. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. - М.: Металлургия, 1976. - 552 с.
2. Самойлович Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка. - Киев: Наук. думка, 1983. - 248 с.
3. О применимости термического критерия качества литья для определения ширины зоны шнуровой ликвации / В. А. Мамишев, Ю. Я. Скок, Л. А. Соколовская, Ф. И. Нечепоренко,

Затвердевание сплавов

- В. М. Дорофеев // Совершенствование процессов непрерывной разливки стали. - Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1985. - С. 35-37.
4. Мамишев В. А. Реотермическая концепция управления кристаллическим строением литых изделий // Процессы литья. - 2004. - № 3. - С. 43-48.
5. Мамишев В. А., Шинский О. И., Соколовская Л. А. О теплофизическом взаимодействии слитка с изложницей и отливки с формой в процессе формирования литой структуры // Литье и металлургия. - 2008. - № 3 (48). - С. 307-309.
6. Мамишев В. А. Методика расчета термовременных параметров затвердевания литых заготовок разной конфигурации // Процессы литья. - 2008. - № 5. - С. 43-49.
7. Мамишев В. А. Обобщенный алгоритм расчета нестационарных температурных полей при затвердевании слитков и отливок разной геометрии // Процессы литья. - 2008. - № 6. - С. 38-44.
8. Соколовская Л. А., Мамишев В. А. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. - 2009. - № 2. - С. 24-29.

Поступила 04.08.2009

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

Расценки на размещение рекламы (цены приведены в гривнях)

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 15 %

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
Справки телефон: (044) 424-12-50, 424-04-10, 424-34-50
факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua