

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ЗАКАЛКЕ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Канд. физ.-мат. наук КРИВОШЕЕВ Ю. К.,
канд. техн. наук КАЛИНИЧЕНКО А. С., инж. КОЖЕМЯКИНА А. С.

Белорусская государственная политехническая академия

Большинство функциональных свойств материалов формируется в ходе процесса затвердевания, который во многом определяется условиями теплообмена и зависит от температуры нагрева расплава перед заливкой, материала закалочного диска, его качества обработки, скорости вращения и температуры, толщины ленты и т. д. Изменение условий теплообмена может осуществляться варьированием коэффициента теплопередачи «валок-контактная поверхность ленты» (например, за счет различной степени чистоты обработки поверхности валька), коэффициента теплоотдачи от свободной поверхности ленты к воздуху за счет изменения частоты вращения валька, температуры заливки, а также коэффициента теплоотдачи от валька к охлаждающей его среде. Последнее обстоятельство крайне важно при создании промышленных установок, когда практическое значение приобретают расчеты тепловых режимов кристаллизаторов для обеспечения длительной работы [1].

Для управления структурой и свойствами отливок, получаемых в процессах непрерывного литья с высокой интенсивностью (закалка из жидкого состояния), необходимо создание математических моделей, позволяющих рассчитать толщину формирующейся заготовки, скорость ее охлаждения и связанное с ней переохлаждение, что позволяет прогнозировать структуру затвердевшей отливки.

Рассмотрим более подробно процесс литья плоским потоком на быстровращающийся кристаллизатор. Толщина ленты, формирующейся при подаче расплава сверху, может быть рассчитана по [2, 3]. Следующим важным параметром процесса скоростного литья, влияющим на характер микроструктуры, а также морфологию процесса затвердевания, является переохлаждение расплава перед началом кристаллизации. Несмотря на то, что опубликован ряд работ по расчету переохлаждения [4–6], вопрос этот до конца не определен, особенно, если металл подается за счет металлостатического напора.

Переохлаждение расплава перед кристаллизацией – движущая сила для образования центров и скорости роста кристаллов и, следовательно, во многом определяет размерные параметры микроструктуры затвердевающей отливки. С другой стороны, величина переохлаждения зависит от многих параметров: химического состава, теплофизических свойств, скорости охлаждения расплава. В традиционных процессах литья величина переохлаждения составляет от десятых долей до нескольких градусов и может быть достаточно точно измерена широко известными способами. В процессах, где скорость охлаждения расплава составляет до 10^6 К/с и выше, экспериментально определить величину переохлаждения крайне проблематично. При этом необходимо принять во внимание, что в высокоскоростных процессах затвердевания наблюдается образование неравновесных и метастабильных фаз, включая формирование аморфного состояния. Все

изложенное подчеркивает значение переохлаждения для управления микроструктурой затвердевающего сплава.

Величина переохлаждения может быть установлена на основании теоретических исследований, включающих расчет тепловых потоков во взаимосвязи с диаграммами состояния, а также экспериментально. В последнем случае используются методы дифференциальной сканирующей калориметрии и дифференциального термического анализа для нахождения величины переохлаждения. Косвенно величину переохлаждения можно определить на основе измерений дендритного параметра, или размера микрочастиц.

Экспериментальные исследования имеют важное значение для подтверждения и уточнения разрабатываемых математических моделей. Исследования показывают, что при достижении критического переохлаждения наблюдается полностью другая морфология затвердевания. На характер формирования ячеистой, или эвтектической, структуры оказывает влияние процесс рекалесценции (выделение скрытой теплоты кристаллизации) и замедление скорости роста зерен [7].

Рассмотрим процесс получения быстроохлажденной ленты из расплава, подаваемого на поверхность вращающегося вала. Расплав при заданной температуре подается на поверхность вращающегося вала из литниковой коробки, установленной сверху. Порция металла, попавшая на периферию вала, удерживается на нем силами поверхностного натяжения, охлаждаясь при вращении. После затвердевания лента сбрасывается центробежными силами и охлаждается на воздухе. Совершив полный оборот, выделенный участок вала захватывает новую порцию металла, и процесс повторяется. В подвижной системе координат, связанной с валом кристаллизатора, можно выделить для вала три зоны: контакта жидкого металла и вала, охлаждения затвердевшей ленты на валке, охлаждения вала без ленты.

В [8, 9] приведены результаты расчетов интенсивности охлаждения слоя расплава, выполненных на основе аналитического решения одномерного уравнения теплопроводности. Недостатком этих расчетов является значительное количество упрощений и допущений (не учитывается теплообмен затвердевшей лентой и кристаллизатора с окружающей средой, принимается постоянство теплофизических свойств, температуры вала и т. д.), что приводило к неточному определению температурных полей в охлаждающейся ленте. Кроме того, отсутствие достаточно корректных методов непосредственного контроля температуры расплава вызывает необходимость корректного математического моделирования тепловой задачи, описывающей охлаждение расплава до его затвердевания и момента отрыва ленты, разогрев вала и последующее его охлаждение.

Толщина ленты намного меньше толщины стенки вала, поэтому задачу теплообмена «валок–лента» можно рассматривать как плоскую одномерную нестационарную в сопряженной постановке. В этом случае распределение температуры слоя расплава определенной толщины описывалось системой уравнений:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < a - h, \quad a < x < a + \delta, \quad t > 0; \quad (1)$$

$$-\lambda_{\text{кр}} \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{\text{ж}}(T_{\text{кр}} - T_{\text{ж}}), \quad x = 0, \quad t > 0; \quad (2)$$

$$-\lambda_{\text{кр}} \frac{\partial T_{\text{кр}}}{\partial x} = \alpha_{\text{к}}(T_{\text{л}} - T_{\text{кр}}), \quad x = a - h, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$-\lambda_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial x} = \alpha_{\text{к}}(T_{\text{л}} - T_{\text{кр}}), \quad x = a, \quad t > 0; \quad (4)$$

$$-\lambda_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial x} = \alpha_{\text{в}}(T_{\text{л}} - T_{\text{в}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{л}}^4 - T_{\text{в}}^4), \quad x = a + \delta, \quad t > 0; \quad (5)$$

$$L\rho \frac{dx}{dt} = \alpha(T_{\text{л}} - T_{\text{кр}}) + X\rho c \frac{dT}{dt}, \quad (6)$$

где a – толщина валка; h – высота микронеровностей поверхности валка; $0 < x < a-h$ – тело валка; δ – толщина ленты; ρ – плотность; c – теплоемкость; α – коэффициент теплоотдачи; L – теплота затвердевания; X – затвердевшая доля металла; индексы: кр – кристаллизатор; л – лента; ж – охлаждающая среда; в – воздух.

Строго говоря, граничные условия между расплавом (затвердевшей лентой) и валком должны описываться граничными условиями четвертого рода. Однако их можно заменить на граничные условия третьего рода путем введения эффективного коэффициента теплопередачи через воздушный зазор, определяемый высотой микронеровностей рабочей поверхности валка.

Следует отметить, что в момент затвердевания лента под действием центробежной силы срывается с поверхности валка-кристаллизатора, валок охлаждается и, описав полный оборот, поступает вновь в зону контакта с расплавом, при этом в качестве начального выступает полученное распределение температуры.

Задача решалась численно, для чего все пространство, в котором ищется распределение температуры, делилось на две области ($K = 1, 2$), причем для тела валка $K = 1$, а ленты – $K = 2$. Каждая расчетная область разбивалась на N_k интервалов, а значения искоемых переменных T_i ($i = 1, 2, \dots$) определяют пространственную дискретизацию задачи. Аппроксимируя пространственные производные в (1)–(6) конечными разностями, приходим к эквивалентной системе, содержащей $N = N_1 + N_2 + 2$ обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых численно методом Рунге–Кутты–Фельдберга с автоматическим выбором шага по времени. Поскольку толщина валка значительно превышает толщину ленты, в области 1 следует ввести сетку с неоднородным шагом по пространственной координате X , причем так, чтобы вблизи границы раздела валок–лента на расстоянии, равном толщине ленты, шаг пространственной дискретизации в валке был одного порядка с шагом в ленте, а в оставшейся области валка – на порядок выше для экономии вычислений. Составлена программа для расчета и определения связей между параметрами процесса охлаждения расплава при закалке из жидкого состояния.

Численное решение системы (1)–(6) проведено для охлаждения лент толщиной от 50 до 150 мкм при разных значениях температуры заливки,

а также для различных коэффициентов теплоотдачи от расплава к валку. На рис. 1 представлены результаты расчетов изменения температуры во времени для контактирующей (внутренней) и свободной (внешней) поверхностей ленты.

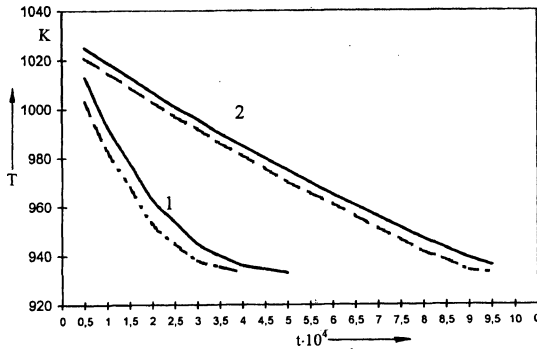


Рис. 1. Изменение температуры слоя расплава толщиной 50 мкм при закалке из жидкого состояния до равновесной температуры затвердевания для коэффициента теплоотдачи, равного $150\,000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ (кривые 1) и $50\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ (кривые 2); пунктирные линии относятся к контактной поверхности расплава, сплошные – к свободной $T_{\text{зал}} = 1033\text{ К}$

Следует отметить, что повышение температуры заливки приводит к увеличению разности температур между контактирующей (внутренней) и свободной (внешней) поверхностями ленты. Например, при температуре заливки 1033 К для $\alpha = 1,5 \cdot 10^5\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ разность температур между поверхностями ленты толщиной 50 мкм составляет величину 3 К, в случае повышения температуры заливки до величины 1133 К и при прочих равных условиях – 10 К. Увеличение коэффициента теплоотдачи уменьшает время достижения температуры затвердевания.

Анализ показывает, что на максимальную скорость охлаждения существенное влияние оказывает температура заливки (рис. 2). Это обусловлено как увеличением плотности теплового потока, так и заметным ростом температуры в зазоре. Теплопроводность воздуха в зазоре, определяющая коэффициент теплоотдачи, существенно зависит от температуры, поэтому рост температуры заливки ведет к увеличению скорости охлаждения расплава.

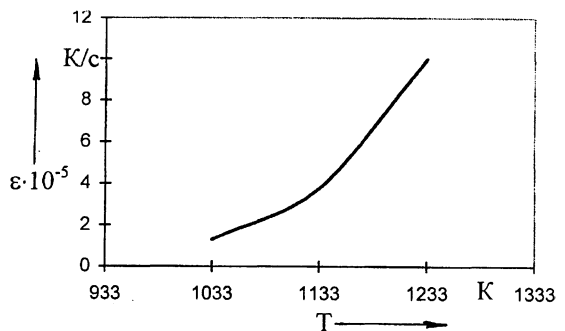


Рис. 2. Влияние температуры заливки на максимальную скорость охлаждения ленты толщиной 50 мкм при $\alpha = 150\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$

Влияние изменения коэффициента теплопередачи на скорость охлаждения показано на рис. 3. При закалке из жидкого состояния он регулируется путем изменения шероховатости поверхности. При увеличении коэффициента теплопередачи наблюдается рост средней температуры валка,

что замедляет скорость охлаждения. В результате конкуренции коэффициента теплопередачи и температуры валка скорость роста увеличивается не так ощутимо, как при изменении температуры заливки.

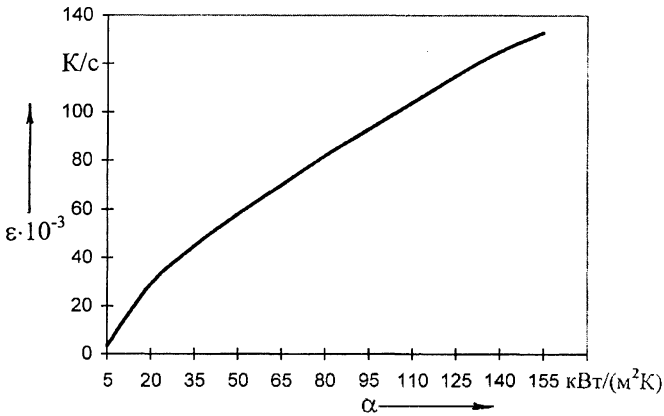


Рис. 3. Влияние коэффициента теплопередачи на скорость охлаждения ленты толщиной 120 мкм при температуре заливки 1033 К

Анализ расчетов показывает, что для алюминиевых сплавов относительная величина переохлаждения должна быть выше 0,42 для того, чтобы весь объем расплава затвердел в процессе рекалесценции, т. е. без формирования выраженной кристаллической структуры. Однако расчеты показали, что максимально достижимая относительная величина переохлаждения (на контактной поверхности) не превышает значения 0,34. Это значит, что по мере развития процесса затвердевания происходит смена морфологии затвердевания.

ВЫВОД

Разработана математическая модель охлаждения ленты в процессе высокоскоростного литья. Проведен анализ влияния некоторых факторов на скорость охлаждения ленты. Результаты расчета с использованием разработанной модели позволяют оценить особенности процесса затвердевания при закалке из жидкого состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abramenko A. N., Kalinichenko A. S., Krivosheev Yu. K. Cooling Systems of Rotating Moulds // Journal of Engineering Physics and Thermophys. – 1993. – Vol. 64, № 4. – P. 401–414.
2. Расчет скорости охлаждения и толщины лент, получаемых закалкой из жидкого состояния / А. Н. Абраменко, А. С. Калиниченко, М. А. Антонец, Э. Д. Сычиков // Научные и прикладные проблемы энергетики. – Мн., 1988. – Вып. 15. – С. 51–55.
3. Anestiev L. A. An analysis of the heat and momentum transfer during rapid quenching of some microcrystalline materials from the melt // Journal of Material Science. – 1990. – Vol. 25. – P. 233–240.
4. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.

5. C a n t o r B. Fundamentals of Rapid Solidification // Science and Technology of Undercooled Melt / Eds. Sahm P. R., Jones H., Adam C. M. Martinus Nijhoff Pub, 1986. – P. 3–28.

6. Shingy P. H., Shimohigashi A., Ishihara K. N. Undercooling of Liquid Metals // Rapidly Quenched Metals: Proc. of Int. conf. Eds. S. Steeb, H. Warlimont / Elsevier Sci. Pub. B. V. – 1985. – P. 35–38.

7. Hailes R., Vincent J. R., Jones H. Structure of Al-3 to 18 wt.%Ni Gun-Quenched From the Melt / Rapid Solidified Metals III. The Metal Society. – 1978. – P. 163–166.

8. Ruhl R. C. Cooling rates in splat cooling // Material Science and Engineering. – 1967. – Vol.1, № 2. – P. 313–318.

9. Набережных В. П., Селяков Б. И., Фельдман Э. П. К теории охлаждения тонкой пленки на массивной подложке // ИФЖ. – 1984. –Т. 47, № 4. – С. 677–680.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 22.05.2001