



The numerical calculations of temperature field in different points of the system "chill-casting" are presented on the basis of three-dimensional equation of heat conduction taking into account boundary condition. Influence of thickness and heat conduction of internal covering of chill on spreading of temperatures in chill at crystallization of casting is analyzed.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ»

УДК 519:669.27

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ОТЛИВКЕ И ФОРМЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Известно, что использование кокильных покрытий при литье в металлические формы является одной из важнейших атрибутов технологического процесса [1]. Покрытия внутренней поверхности формы в виде различных красок позволяют повысить стойкость кокиля за счет снижения поля термических напряжений, образующегося при теплообмене «отливка–форма» [2, 3]. Поэтому исследование влияния кокильных покрытий на температурное поле формы является важнейшей задачей литейного производства. В зависимости от толщины кокильной краски и ее теплофизических свойств можно существенно изменять тепловой режим работы формы. Однако он зависит как от пространственной конфигурации кокиля, так и от его теплофизических свойств, что довольно сложно учесть при разработке технологического процесса литья в кокиль. В связи с этим расчеты температурных полей кокиля и отливки в условиях варьирования свойств кокильного покрытия представляют как научный, так и практический интерес.

Цель работы – моделирование температур в отливке и металлической форме при варьировании параметров кокильных покрытий с различными теплофизическими свойствами.

В основу метода моделирования температуры отливки и кокиля положено уравнение теплообмена Фурье–Кирхгофа [4]:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} + U \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, T). \quad (1)$$

Теплообмен на поверхности твердого тела с расплавом описывается как:

$$\alpha \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (расплава);  $t$  – время процесса охлаждения и кристаллизации;  $T$  – температура в рассматриваемой точке потока ( $x, y, z$ );  $\lambda$  и  $c$  – соответственно теплопроводность и теплоемкость в рассматриваемой точке;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на граничной поверхности.

Для расчета распределения температур использовали конечно-разностные аппроксимации следующего вида:

$$T_{x,y,z}^{n+1} = T_{x,y,z}^n + \tau \frac{\lambda}{\rho c_0} \left( \frac{T_{x-1,y,z}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x+1,y,z}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{x,y-1,z}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x,y+1,z}^n}{\Delta y^2} + \frac{T_{x,y,z-1}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x,y,z+1}^n}{\Delta z^2} \right), \quad (3)$$

где  $\tau$  – шаг по времени.

В случае если клетка граничит с формой, вводится коэффициент теплоотдачи на граничной поверхности  $\alpha$  и уравнение (3) примет вид

$$T_{x,y,z}^{n+1} = T_{x,y,z}^n + \tau \frac{\lambda}{\rho c_0} \left( \frac{\alpha_{x-1,y,z} (T_{x-1,y,z}^n - T_{x,y,z}^n) + \alpha_{x+1,y,z} (T_{x+1,y,z}^n - T_{x,y,z}^n)}{\Delta x^2} + \frac{\alpha_{x,y-1,z} (T_{x,y-1,z}^n - T_{x,y,z}^n) + \alpha_{x,y+1,z} (T_{x,y+1,z}^n - T_{x,y,z}^n)}{\Delta y^2} + \frac{\alpha_{x,y,z-1} (T_{x,y,z-1}^n - T_{x,y,z}^n) + \alpha_{x,y,z+1} (T_{x,y,z+1}^n - T_{x,y,z}^n)}{\Delta z^2} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha$  для каждого перехода принимается разным в зависимости от типа соприкасающихся поверхностей. Для границы «расплав–расплав» коэффициент  $\alpha$  принимается равным единице.

На основе уравнения (1), используя сеточные методы и программу ПроЛит-1 [5–7], было промоделировано распределение температур в стальном кокиле, ширина стенки которого составляет 15 мм. При моделировании весь объем кокиля и отливки был разбит на сеточные элементы с помощью пространственной равномерной сетки. В зависимости от положения в пространстве каждой клетке (форма, отливка, воздух) присваивали соответствующие физические свойства (теплопроводность, теплоемкость, плотность и т.д.). Схема рассчитываемого цилиндрического кокиля показана на рис. 1.

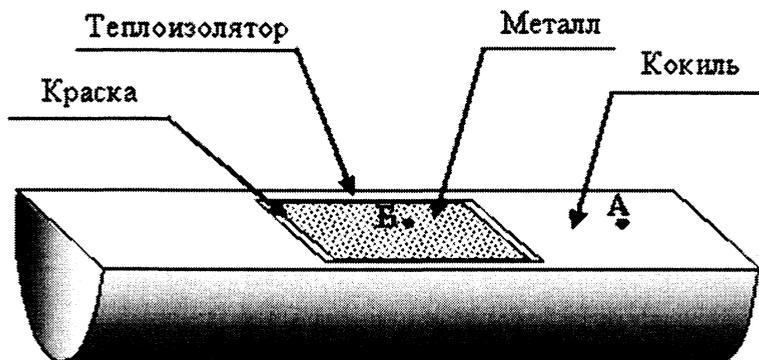


Рис. 1. Схема расположения отливки в кокиле

Алюминиевая отливка представляет собой цилиндр высотой 10 мм и диаметром 10 мм. Между кокилем и отливкой с торцов цилиндра нанесена краска различной толщины и теплопроводности. Остальная часть цилиндра покрыта теплоизолятором, поэтому основной теплоотвод осуществляется в направлении оси  $X$ . Объект был разбит на 183 055 ячеек с шагом по пространству 0,25 мм.

В качестве материала для отливки использовали алюминий АК9 при температуре заливки  $700^{\circ}\text{C}$  и соответствующих температурах ликвидуса  $T_{\text{liq}}=594^{\circ}\text{C}$  и солидуса  $T_{\text{sol}}=567^{\circ}\text{C}$ . При моделировании теплопроводность, теплоемкость и плотность металла выбирали как функцию от температуры. В качестве материала кокиля использовали сталь со следующими теплофизическими свойствами: теплопроводность  $\lambda=54,5$  Вт/(м·К); теплоемкость  $c=920$  Дж/(кг·К); плотность  $\rho=7500$  кг/м<sup>3</sup>. Начальная температура кокиля была принята равной  $200^{\circ}\text{C}$ . В качестве внутренних покрытий кокиля использовали краску 1 со следующими теплофизическими характеристиками: теплопроводность  $\lambda=1,37$  Вт/(м·К); теплоемкость  $c=920$  Дж/(кг·К); плотность  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup> (начальная температура краски  $200^{\circ}\text{C}$ ) и краску 2 со следующими теплофизическими характеристиками: теплопроводность  $\lambda=0,28$  Вт/(м·К); теплоемкость  $c=920$  Дж/(кг·К); плотность  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup> (начальная температура краски  $200^{\circ}\text{C}$ ).

При проведении расчетов были решены задачи по оценке влияния толщины покрытия и его теплофизических свойств на температурное поле кокиля и отливки. Для анализа динамики изменения температурного поля в кокиле и отливке были выделены точки А и В (рис. 1). Поэтому динамику изменения температуры рассматривали в этих точках. На рис. 2 показана динамика изменения температуры в точке А для краски различной толщины.

Как видно из рисунка, с увеличением толщины слоя краски скорость изменения температуры в точке А уменьшается. Причем без покрытия температура кокиля увеличивается по закону, близкому к параболическому. На момент времени  $\tau=6$  с температура кокиля без покрытия повышается на  $\Delta T \approx 50^{\circ}\text{C}$ , а при толщине покрытия  $d=1$  мм на  $\Delta T \approx 20^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что увеличение толщины слоя покрытия при заданной теплопроводности приводит к меньшему развитию температурных градиентов по температуре в кокиле. На рис. 3 представлена зависимость температуры в точке А кокиля от времени для различных значений теплопроводности покрытия. Как видно из рисунка, чем выше теплопроводность покрытия, тем быстрее нагревается кокиль. Причем при теплопроводности  $\lambda=1,57$  Вт/(м·К) на момент времени  $\tau=6$  с изменение температур по отношению к начальному состоянию составляет  $\Delta T \approx 40^{\circ}\text{C}$ . В то же время для краски теплопроводностью  $\lambda=0,28$  Вт/(м·К) изменение температуры в точке А по отношению к начальному состоянию составляет  $\Delta T \approx 15^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что чем выше теплопроводность краски, тем быстрее нагревается кокиль и тем большие градиенты температур могут развиваться в нем.

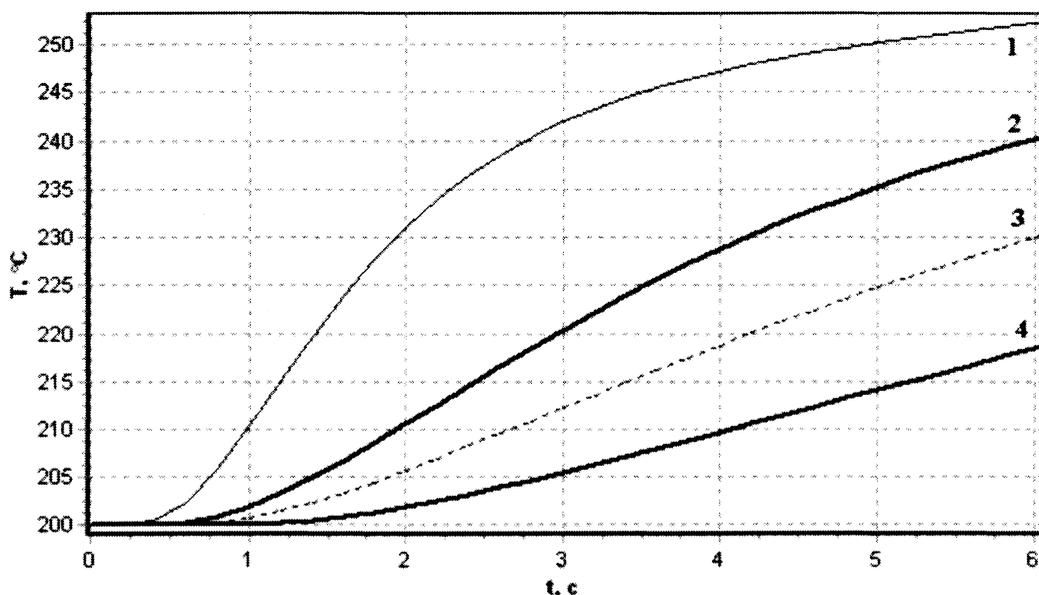


Рис. 2. Влияние толщины покрытия теплопроводностью  $\lambda=1,37$  Вт/(м·К) на температуру в точке А кокиля: 1 – без слоя краски; 2 – для слоя краски 0,25 мм; 3 – для слоя краски 0,5 мм; 4 – для слоя краски 1 мм

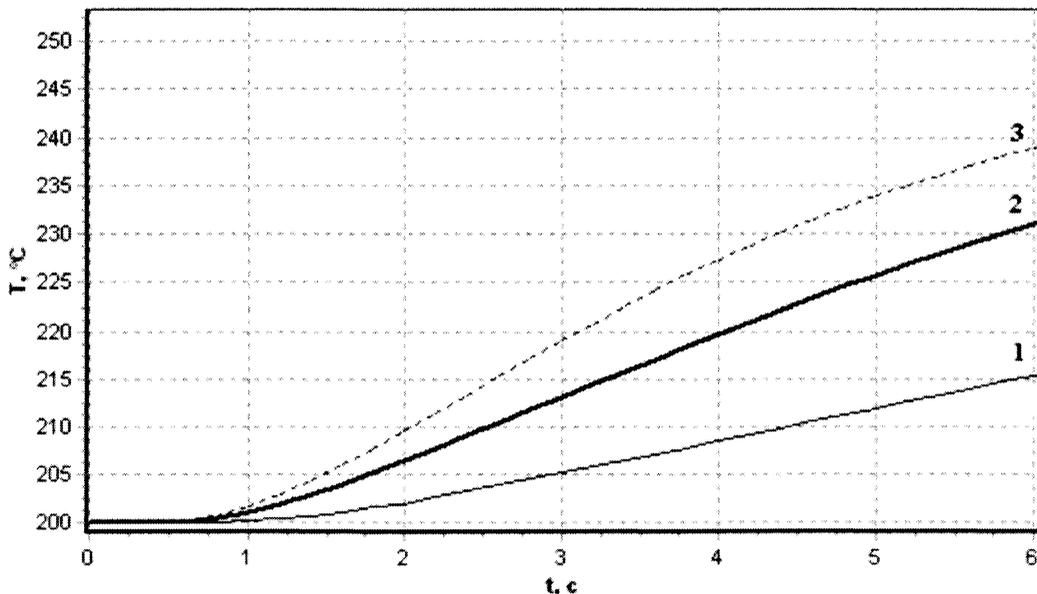


Рис. 3. Влияние теплопроводности краски толщиной  $d=0,25$  мм на температуру в точке А кокиля: 1 –  $\lambda=0,28$  Вт/(м·К); 2 – 0,7; 3 – 1,37 Вт/(м·К)

На рис. 4 показана зависимость изменения температуры в точке *Б* отливки от времени для различных вариантов толщины покрытия. Как видно из рисунка, без использования покрытия температура в отливке уменьшается по закону, близкому к экспериментальному практически для всего интервала рассчитываемых времен. Нарушение закона изменения температуры в момент времени  $\tau < 1$  с связано с изменением процесса кристаллизации на интервале температур между ликвидусом и солидусом, где выделяется скрытая теплота кристаллизации. Увеличение толщины покрытия кокиля изменяет динамику уменьшения температуры в точке *Б*, о чем свидетельствует появление протяженных участков, напоминающих температуры кристаллизации. Это связано с тем, что покрытие тормозит теплопередачу от отливки к кокилю, что приводит к отклонению закона изменения температуры от экспоненциального. Подобный «эффект» изменения температуры в точке *Б* наблюдается при изменении теплопроводности краски (рис. 5). Как видно из рисунка, низкая теплопроводность краски препятствует теплообмену между отливкой и кокилем, что создает эффект «торможения» охлаждения отливки.

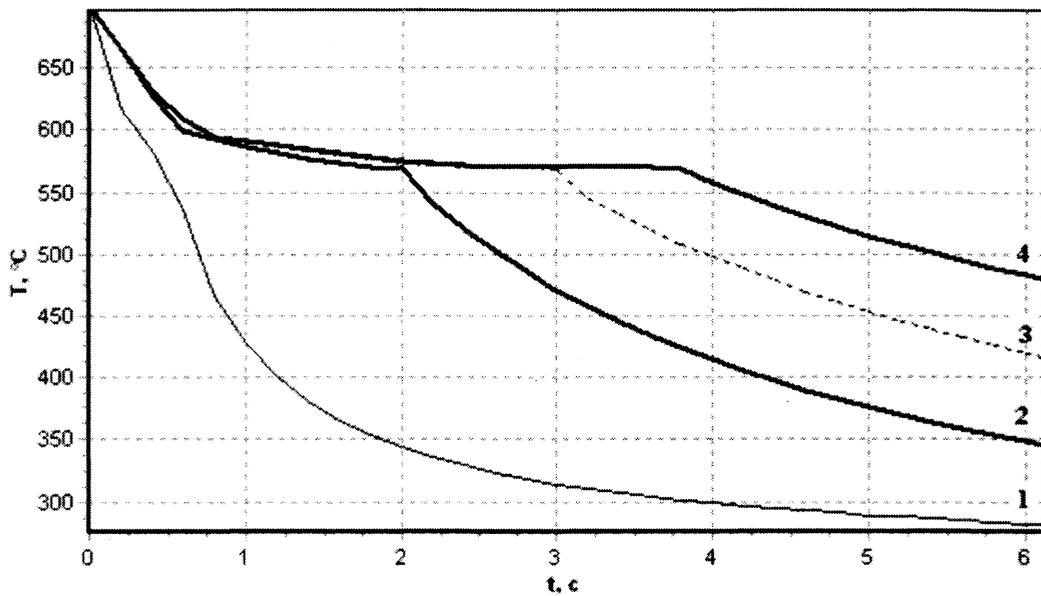


Рис. 4. Влияние толщины покрытия теплопроводностью  $\lambda=1,37$  Вт/(м·К) на температуру в точке *Б* отливки: 1 – без слоя краски; 2 – для слоя краски 0,25 мм; 3 – для слоя краски 0,5 мм; 4 – для слоя краски 1 мм

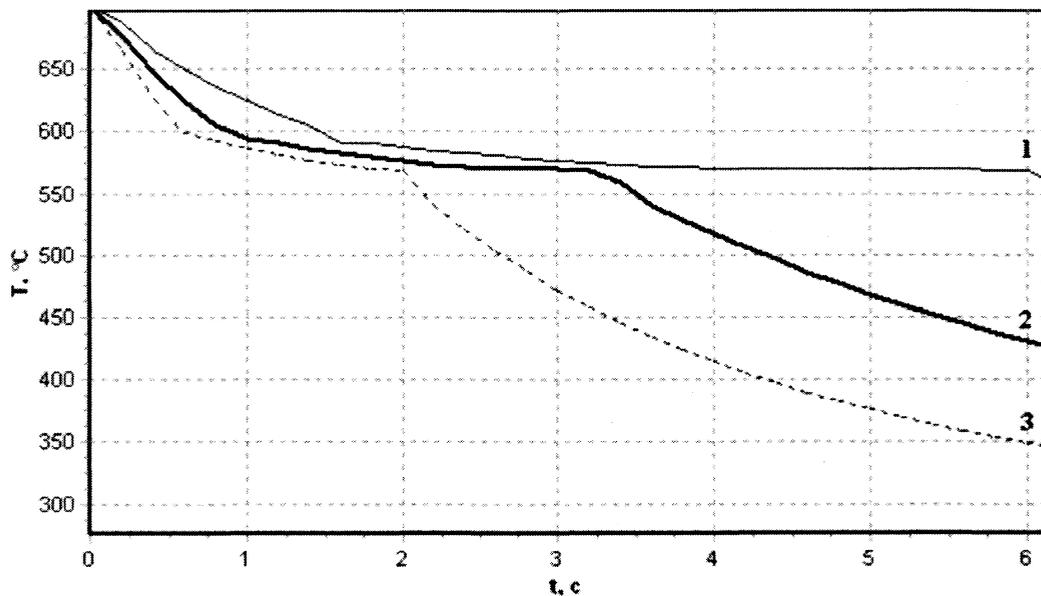


Рис. 5. Влияние теплопроводности краски толщиной  $d=0,25$  мм на температуру в точке *Б* отливки: 1 –  $\lambda=0,28$  Вт/(м·К); 2 – 0,7; 3 – 1,37 Вт/(м·К)

На рис. 6 приведено частотное распределение числа ячеек формы по температурам для различных времен охлаждения отливки. Как видно из рисунка, с увеличением времени от  $\tau=2$  до  $\tau=6$  с растет число ячеек, имеющих высокие температуры, что свидетельствует о постоянном нагреве кокиля.

Влияние теплопроводности покрытия на процесс нагрева кокиля показано на рис. 7. Сравнивая частотные распределения по температуре для различных покрытий, можно заметить, что чем выше теплопроводность формы, тем выше средняя температура кокиля.

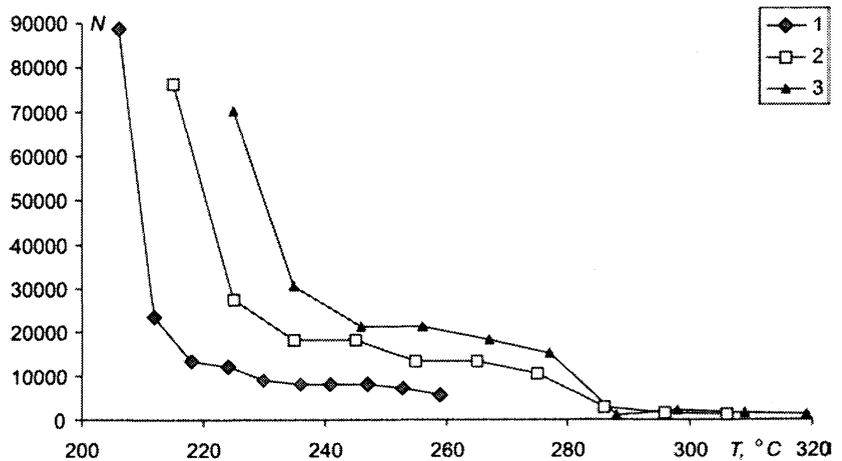


Рис. 6. Распределение числа ячеек формы по температурам для кокильного покрытия толщиной  $d=0,5$  мм и теплопроводностью  $\lambda=1,37$  Вт/(м·К) с различными теплопроводностями на моменты времени охлаждения: 1 –  $\tau=2$  с; 2 – 4; 3 – 6 с

Увеличение толщины покрытия способствует торможению теплоотвода от отливки к ячейкам кокиля (рис. 8). Аномальное поведение зависимости числа ячеек по температурам для кокиля без покрытия может свидетельствовать о наличии температурных градиентов на границе «металл-форма». При отсутствии покрытия на внутренней поверхности кокиля температурное поле изменяется сложным образом.

Таким образом, проведенные расчеты позволили показать, что увеличение толщины покрытия способствует снижению объемной функции распределения температуры на поверхности кокиля, в то время как повышение теплопроводности краски приводит к повышению температуры кокиля по всему объему кокиля. Компьютерное моделирование процесса охлаждения отливки в кокиле показывает широкие возможности прогнозирования динамики температурного поля кокиля.

**Литература**

1. Вейник А.И. Кокиль. Мн.: Наука и техника, 1972.
2. Заславский М.Л. Литье в металлическую форму. М.: ВИНТИ, 1968.
3. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Марков Л.В. О перспективах разработки методов расчета кокилей на основе компьютерных технологий // Литье и металлургия. 2004. № 2. С.19-21.
4. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г., Лукашевич Ф.С. Компьютерная система «ПроЛит-1» для моделирования течения и охлаждения расплавов // Литье и металлургия. 2003. №4. С. 64-72.
5. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПРОЛИТ» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. №4. С. 47-48.
6. Чичко О.И., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Информационные технологии в задачах анализа скоростных потоков расплава в литниковых каналах // Литье и металлургия. 2002. №3. С. 16-20
7. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Компьютерная система «ПроЛит» – инструмент для повышения качества // ТЭО. 2001. № 6. С. 30-31.

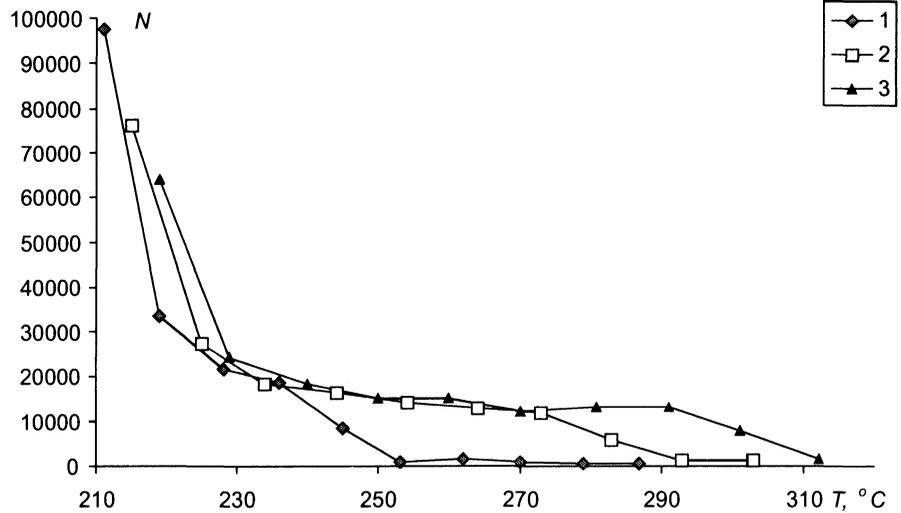


Рис. 7. Распределение числа ячеек кокиля по температурам для покрытий толщиной  $d=0,25$  мм с различными теплопроводностями: 1 –  $\lambda=0,28$  Вт/(м·К); 2 – 0,7; 3 – 1,37 Вт/(м·К) на момент времени охлаждения  $\tau=4$  с

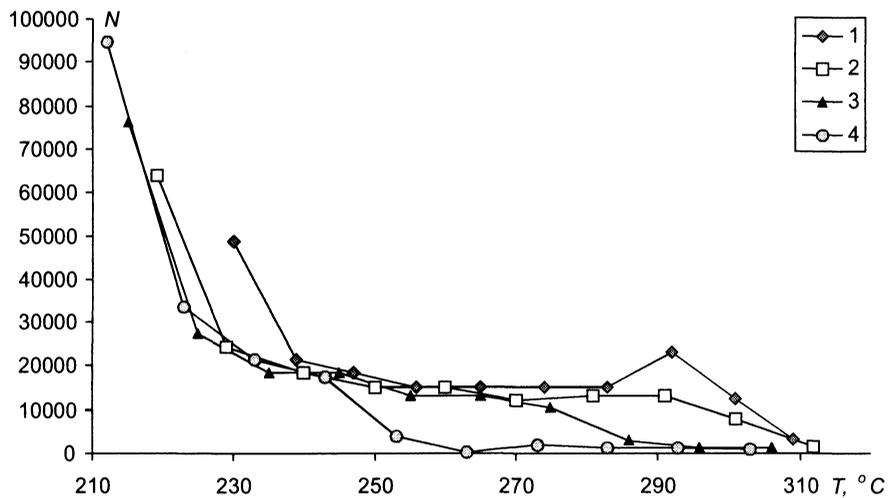


Рис. 8. Распределение числа ячеек кокиля по температурам для покрытий теплопроводностью  $\lambda=1,37$  Вт/(м·К) различной толщины: 1 –  $d=0$ ; 2 – 0,25 мм; 3 – 0,5; 4 – 1 мм на момент времени охлаждения  $\tau=4$  с