

4. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Шрейбер Г.К. Ударно-абразивный износ буровых долот. — М.: Недра, 1975. — 163 с.
5. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. — М.: Наука, 1970. — 251 с.
6. Львов Н.П. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1966. — 330 с.
7. Гарбер М.Е. Отливки из белых износостойких чугунов. — М.: Машиностроение, 1972. — 109 с.
8. Попов В.С., Брыков Н.Н. Упрочнение стали Х12Ф1 при абразивном изнашивании // Металловедение и термическая обработка металлов, 1969. — 12. — С. 68–70.
9. А. С. 1366546 СССР, МКИ2 С22С 37/06. Чугун / Пилюшенко В. Л., Зборщик А. М., Шаповалов Ю.С. (СССР). — № 108839/31-02; Заявл. 08. 08. 86; Оpubл. 15. 01. 88, Бюл. № 2. — 4 с.
10. Воробьев Г.М., Калинина А.Т., Соболевский С.И. Белые износостойкие сложнолегированные чугуны // Изв. Вузов. Черная металлургия, 1979. — № 12. — С. 79–92.

© Пилюшенко В.Л., Шаповалов Ю.С., 1999.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И НАГРЕВЕ СЛИТКОВ

КАЗАНЦЕВ Е.И., ГИНКУЛ С.И. (ДонГТУ)

На основании решения дифференциального уравнения теплопроводности для трехмерного температурного поля разработана математическая модель кристаллизации, охлаждения и нагрева тел прямоугольной формы. Выполненные по этой модели исследования и внедренная энергосберегающая технологическая инструкция по доставке слитков от разливки и до посадки их в нагревательные колодцы позволила повысить температуру всада слитков на 200°C и сэкономить до 25% топлива.

Вопросы формирования кристаллического строения слитка чрезвычайно сложны. Они связаны с зародышами кристаллизации, ростом дендритов, падением кристаллов в жидком объеме, движением расплава во время затвердевания и прочее. Все это сказывается на структуре и свойствах литого металла, приводит к явлениям ликвации, сегрегации и различию теплофизических свойств слитка. Основу этого процесса составляют тепловые явления, т.к. охлаждением металла обуславливается протекание процесса формирования слитка. Начиная от работ Ляме и Клапейрона (1831 г.), Стефана (1890 г.) и в дальнейшем работ Хворинова Н.И. (1939 г.), Тагеева В.М. и Гуляева Б.Б. (1939 г.), Иванцова Г.П. (1951 г.), Вейника А.И. (1950) [1–6] и многих других рассматриваются вопросы различных вариантов теплообмена между слитком и окружающей средой.

В статье рассматривается только процесс образования слитка вследствие его охлаждения в изложнице, без нее и последующий нагрев в печи. Задача решена комплексно — от разливки слитков и до их прокатки. Решение выполнено для трехмерного температурного поля, доведено до практического решения. На его основе можно решать вопросы ресурсосбережения, оптимизации температурных и тепловых параметров охлаждения и нагрева слитков и осуществить рациональное управление их величинами в режиме реального времени с учетом температурного состояния металла. Приведено трехмерное поле тепловых потоков на грани слитка, позволяющее вмешиваться в процесс нагрева и получать желаемое поле температур, что может оказаться актуальным при нагреве слитков для процессаковки, при нагреве массивных тел для термообработки и прочее.

Одной из важнейших задач энергосберегающих технологий различных стадий металлургического производства является максимальное использование физического тепла предыдущего передела. Задача настоящей работы — разработка технологии максимального использования тепла жидкой стали при минимальных количествах затрат топлива на создание необходимого поля температур в слитке при прокатке на стане. Для этого надо знать температурное состояние слитка и как (know — how) необходимо производить доставку слитков после разливки и их подготовку к прокатке (кристаллизация — охлаждение — нагрев). Эта задача и была решена путем математического моделирования температурного состояния стального слитка. Разработана новая технология доставки слитков (от разливки — до прокатки стали) с учетом качества прокатанной заготовки, создания новых температурных и тепловых режимов нагрева металла в ячейке колодцев.

Изменение температурного состояния слитка во времени можно определить, решая дифференциальное уравнение теплопроводности, которое с учетом влияния температуры на теплофизические свойства металла для трехмерного температурного поля запишется в виде:

$$c_m \rho_m \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \rho_m L_{кр} \frac{\partial \psi}{\partial \tau}. \quad (1)$$

где λ_m — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; c_m — теплоемкость, Дж/кг·К и ρ_m — плотность, кг/м³ металла; $L_{кр}$ — скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг; ψ — относительное количество твердой фазы.

Введя замену $\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial \psi}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau}$, получим после подстановки $\lambda_m^* = \lambda_{тв}(t) \cdot \psi + \lambda_{ж}(1-\psi)$; $c_m^* = c_{тв}(t) \cdot \psi + c_{ж}(1-\psi) - L_{кр} \frac{\partial \psi}{\partial t}$; $\rho_m^* = \rho_{тв}(t) \cdot \psi + \rho_{ж}(1-\psi)$, далее имеем:

$$c_m^* \rho_m^* \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m^* \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m^* \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m^* \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где λ_m^* , c_m^* , ρ_m^* — эффективные коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность металла.

Значения величин с индексом «тв» принимаются для твердого металла в зависимости от температуры, а с индексом «ж» для жидкого металла.

Относительное количество твердой фазы ψ , находящейся в равновесии с жидкостью при температуре t составляет [7]:

$$\psi = \frac{V_{тв}}{V_o} = \frac{C_{ж} - C_o}{C_{ж} - C_{тв}}.$$

Концентрации углерода определяются по диаграмме Fe — C в зависимости от температуры t и начальной концентрации углерода в стали.

За начальные условия для слитка принимаем температуру жидкого металла в момент разливки, т.е. при $\tau=0$:

$$t(x, y, z) = t_{пл} + \Delta t_{перегр}, \quad (3)$$

где $t_{пл}$ — температура плавления металла, °С; $\Delta t_{перегр}$ — перегрев металла, °С.

При расчетах необходимо учитывать изменения температур слитка, и изложницы по всем координатам. В процессе охлаждения между слитком и изложницей образуется зазор, который со временем увеличивается. Считаем, что в зазоре между слитком и внутренней поверхностью изложницы происходит теплообмен с коэффициентом $\lambda_{\text{звз}}$, Вт/(м·К).

Граничные условия между слитком и изложницей (рисунок 1) запишутся в виде:

$$-\lambda_m^* \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\lambda_{\text{звз}}}{\delta_{\text{и.сл.}}}_{x_1} (t_{\text{yz1}}^{\text{сл}} - t_{\text{yz1}}^{\text{и.вн}}) + C_{\text{пр1}}^{\text{и.сл}} \left[\left(\frac{T_{\text{yz1}}^{\text{сл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{yz1}}^{\text{и.вн}}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{звз}}$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\delta_{\text{и.сл.}}$ — величина зазора между слитком и изложницей, м; $C_{\text{пр1}}^{\text{и.сл}}$ — приведенный коэффициент излучения в зазоре, Вт/(м²К⁴); $t_{\text{yz1}}^{\text{сл}}$, $T_{\text{yz1}}^{\text{сл}}$ — температура поверхности слитка вдоль оси Y на высоте Z в точке 1, °С, (К); $t_{\text{yz1}}^{\text{и.вн}}$, $T_{\text{yz1}}^{\text{и.вн}}$ — температура на внутренней поверхности изложницы в той же точке 1, °С, (К).

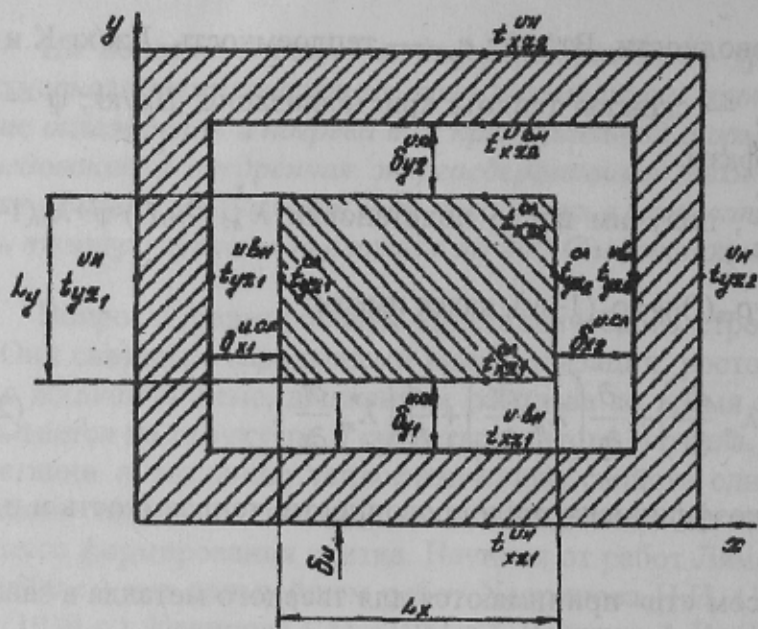


Рисунок 1 — Схема теплообмена между слитком и изложницей

для верхнего основания слитка запишутся:

$$-\lambda_m^* \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=h_{\text{сл}}} = C_{\text{пр5}} \left[\left(\frac{T_{\text{xy}}^{\text{сл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ос}}}{100} \right)^4 \right] \mp q_{\text{звз}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{пр5}}$ — приведенный коэффициент излучения в окружающую среду от верхнего основания слитка, Вт/(м² К⁴); $T_{\text{xy}}^{\text{сл}}$ — температура поверхности слитка на верхнем основании, К; $T_{\text{ос}}$ — температура окружающей среды, К; $q_{\text{звз}}$ — удельный тепловой поток от засыпки, Вт/м².

Аналогично расписываются уравнения по другим направлениям.

Верхнее основание слитка контактирует с окружающей средой. Тепло с поверхности слитка излучается в окружающее пространство. Для уменьшения тепловых потерь на верхнее основание слитка иногда насыпается засыпка, представляющая дополнительное термическое сопротивление. В некоторых случаях в засыпке происходит выделение тепла, которое подводится к слитку и снижает скорость кристаллизации в его верхней части.

Граничные условия

Нижним основанием слиток соприкасается с изложницей или поддоном. В этом случае теплообмен между нижним основанием слитка и изложницей близок к граничным условиям 4^{го} рода, когда между телами существует плотный контакт, граничные условия запишем в виде:

$$t_u|_{z=0} = t_{cn}|_{z=0}, \quad \lambda_u \frac{\partial t}{\partial z}|_{z=0} = \lambda_m \frac{\partial t}{\partial z}|_{z=0}. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности изложницы:

$$c_u \rho_u \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где λ_u , c_u , ρ_u — соответствующие значения величин материала изложницы.

Начальные условия:

$$t_{x,y,z} = t_{нач}^u. \quad (8)$$

Наружная поверхность изложницы омывается окружающей средой. При разработке математической модели предполагалось, что температура среды и тепловой поток, подводимый к наружной поверхности изложницы, различны по каждой грани и по высоте изложницы. Кроме того, изменение теплового потока и температуры среды происходит и во времени.

Теплообмен изложницы с окружающей средой в направлении оси X выразится следующим уравнением:

$$-\lambda_u \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0-\delta_{zn, cn} - \delta_u} = \alpha_{к1}^{oc} (t_{yz1}^{oc} - t_{yz1}^{и.н.}) + C_{пр1}^{oc.и.} \left[\left(\frac{T_{yz1}^{oc}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{yz1}^{и.н.}}{100} \right)^4 \right], \quad (9)$$

где $\alpha_{к1}^{oc}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией в окружающую среду от наружной поверхности изложницы вдоль оси Y , Вт/(м²К); $C_{пр1}^{oc.и.}$ — коэффициент излучения в окружающую среду от наружной поверхности изложницы вдоль оси Y , Вт/(м²К⁴); t_{yz1}^{oc} , T_{yz1}^{oc} , $t_{yz1}^{и.н.}$, $T_{yz1}^{и.н.}$ — температура окружающей среды и наружной поверхности изложницы по оси Y , °С (К)

Граничные условия вдоль остальных направлений записываются аналогично. Решение уравнения (2) с начальными (3) и граничными условиями (4)–(6) и уравнения (7) с начальными (8) и граничными условиями (9) выполнялось конечно-разностным методом по неявной схеме с использованием метода прогонки на ЭВМ. В такой постановке задача и ее решение отличаются от известных нам литературных публикаций.

На рисунке 2 показаны кривые изменения температур, рассчитанные на ЭВМ для конкретных заводских слитков по данным существующей инструкции металлургического комбината. Там же приведены возможные изменения температур в процессе кристаллизации, охлаждения и последующего их нагрева в колодцах. Это приводит к существенному уменьшению расхода топлива на нагрев металла при неизменном качестве стали.

В работе [8] приведены результаты моделирования процессов охлаждения слитков в изложнице и их нагрева в колодцах для двухмерного температурного поля. Это позволяет определить температурное поле в нужном сечении по высоте. Однако такой подход не позволяет исследовать температурное поле по всему объему. В отличие от работы [8] в статье [9] приводятся результаты расчетов динамики изменения трехмер-

ного температурного поля слитка. Решение проводили с использованием явной разностной схемы. Это требует больших затрат машинного времени, поскольку для получения устойчивого решения шаг по времени должен находиться в определенной зависимости от шага по координате. Применение в настоящей работе неявной разностной схемы позволяет в несколько раз сократить время расчета процесса охлаждения — нагрева слитка.

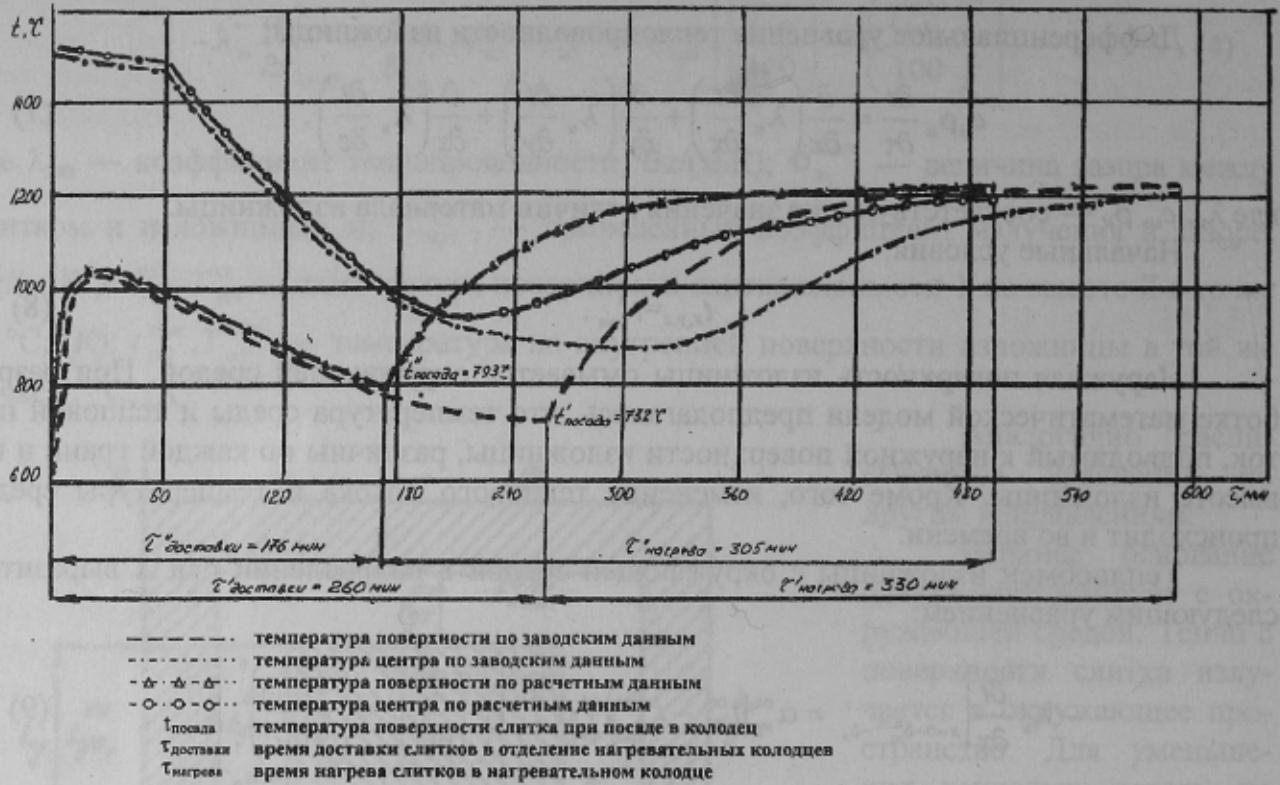


Рисунок 2 — Изменение температуры слитка в период доставки и нагрева

В приведенной выше математической модели предполагается, что наружная поверхность изложницы взаимодействует со средой (граничные условия 3-го рода) или задается усвоенный тепловой поток (граничные условия 2-го рода). Температура среды или тепловой поток меняются не только во времени, но и по граням и по высоте слитка (трехмерная задача).

Для уменьшения усадочной раковины на практике применяют прибыльные надставки иногда с теплоизоляционными вкладышами. Применение их замедляет падение температурного поля слитка и изложницы в верхней части. Расчет теплообмена в системе «слиток — вкладыш — изложница — окружающая среда» приводит к усложнению задачи теплообмена. Проще получается решение, если по высоте вкладыша (прибыльной надставки) коэффициент теплопроводности изложницы заменить эффективным коэффициентом теплопроводности изложницы. Такая замена при известной толщине стенки изложницы равна термическому сопротивлению стенки изложницы, равному тепловому сопротивлению системы «вкладыш — зазор — изложница»:

$$\lambda_{эф} = \delta_u / \left(\frac{\delta_{вк}}{\lambda_{вк}} + \frac{\delta_{ззз}}{\lambda_{ззз}} + \frac{\delta_u}{\lambda_u} \right), \quad (10)$$

где $\delta_{вк}$, $\delta_{ззз}$, δ_u — соответственно толщина вкладыша, величина зазора между вкладышем и изложницей, толщина изложницы, м; $\lambda_{вк}$, $\lambda_{ззз}$, λ_u — соответственно коэффици-

енты теплопроводности материала вкладыша, газа в зазоре вкладыш — изложница, материала изложницы, Вт/(м К). В этом случае изложница по высоте выполнена как бы из двух материалов. Одна часть изложницы, высотой равной высоте вкладыша, выполнена из материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{эф}$, другая часть — с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{и}$. Эффективный коэффициент теплопроводности является функцией величины зазора, температуры вкладыша и изложницы.

По результатам моделирования рассчитывается время полной кристаллизации слитка и тем самым определяется необходимое время выдержки слитков в сталеплавильном цехе и ЦПС. В технологических инструкциях (из-за возможного выплескивания жидкой стали в процессе разведения слитков, которое однажды привело к человеческим жертвам), это время, как правило, завышается. Математическое моделирование позволяет четко определить температурное состояние металла в любой момент времени и на этой основе составить безопасные параметры доставки слитков и разработать энергосберегающую технологию.

Для одного из металлургических заводов выполнено моделирование на ЭВМ процесса охлаждения и нагрева слитков (рисунок 2) с учетом наличия жидкой фазы в слитке. Как показали результаты исследования, время выдержки в разливочном пролете и стрипперном отделении значительно превышает время кристаллизации. Уменьшенные времени выдержки позволяет повысить температуру погрузки металла.

При разработке заводской технологической инструкции за начальные условия при нагреве принимали температурное поле слитка в момент посадки, получившееся за время охлаждения, которое принято в качестве оптимального для энергосберегающей технологии $t(x, y, z)_{\tau=0} = t(x, y, z)_{\tau=\tau_{опт}}$

На рисунке 3 приведен пример компьютерной волюмотермограммы (пространственного распределения температур) в сечении слитка при охлаждении и проекции изотерм на плоскость YOX для того же момента времени.

На рисунке 4 приведен пример трехмерного поля тепловых потоков, падающих на грани слитка при нагреве, полученного расчетным путем на основе экспериментальных замеров температур в его теле. В другой постановке получаем трехмерное распределение температур внутри слитка по заданным величинам падающих на грани тепловых потоков в объеме.

Температурное поле ячейки колодцев неравномерно по объему. Неравномерность температурного поля ячейки в процессе нагрева необходимо учитывать по каждой грани и высоте слитка (рисунок 4). В связи с этим граничные условия нагрева можно записать следующим образом:

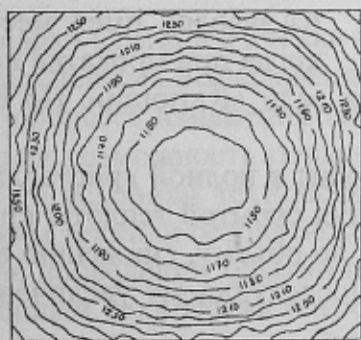
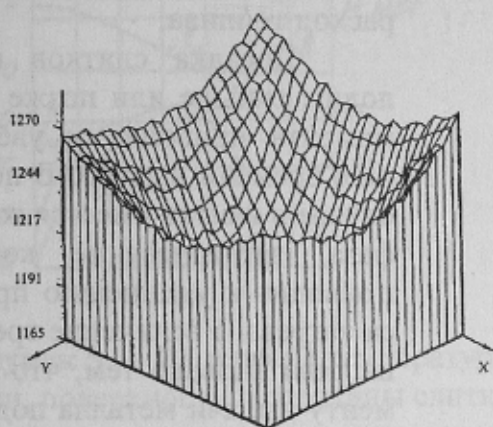


Рисунок 3 — Пример компьютерной волюмотермограммы (пространственного распределения температур) и изотермы в центральном сечении слитка

этим граничные условия нагрева можно записать следующим образом:

$$\mp \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{n=0}^{n=l_i} = \left\{ q_{li} + C_{пр} \left[\left(\frac{T_{ср}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \right\}_{n=0}^{n=l_i} \quad (11)$$

где q_{li} — плотность теплового потока, подводимого к слитку по граням и основаниям, Вт/м²; $C_{пр}$ — приведенный коэффициент излучения на каждой грани и основаниях слитка, Вт/(м² К⁴); $T_{ср}$ — температура среды по высоте слитка на каждой грани и основаниях слитка, К; T — температура поверхности слитка по высоте на каждой грани и основаниях слитка, К.

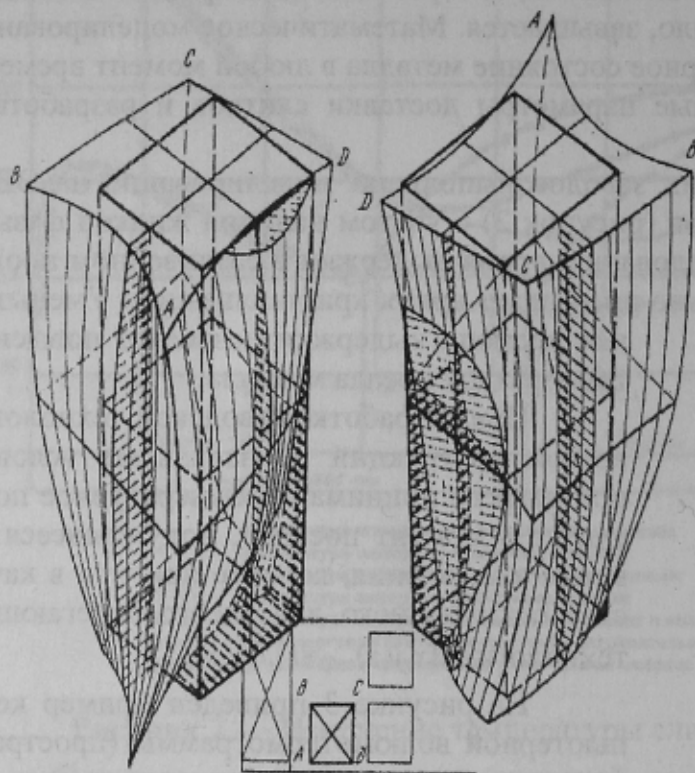


Рисунок 4 — Пример эпюр трехмерного поля тепловых потоков при нагреве слитка

жидкая сталь «выстрелила» в пространство цеха, как залп «Катюши». По счастливой случайности все обошлось благополучно.

Увеличение времени охлаждения слитка приводит к полной кристаллизации металла до его посадки в колодцы. Отсутствие выделения скрытой теплоты кристаллизации ведет к более интенсивному охлаждению слитка по объему, снижению его средне-массовой температуры. Это в свою очередь ведет к последующему увеличению времени нагрева слитков в колодцах.

Нахождение такого начального состояния слитка с определенным содержанием жидкой фазы, при котором время нагрева является минимальным, было целью проводимых исследований (know how) на металлургическом комбинате для конкретного развеса слитка, определенной марки стали, типа слитка, типа и размеров изложницы, условий охлаждения и других обстоятельств.

По принятым технологическим условиям существовавший график движения слитков на заводе не позволял организовать нагрев слитков с жидкой сердцевиной, несмотря на удачное расположение поточной линии металлургического производства —

Решение совместных задач охлаждения и нагрева позволяет определить тот момент, когда необходимо осуществлять посадку слитков в колодцы с учетом условий техники безопасности. Это обеспечивает минимальное время нагрева и, следовательно, минимальный расход топлива.

Посадка слитков в колодцы раньше или позже этого момента приводит к увеличению времени нагрева. В первом случае в слитке имеется жидкая фаза, затвердевание которой приводит к удлинению процесса нагрева. Увеличение времени нагрева вызвано тем, что к моменту выдачи металла под прокатку в нем не должно содержаться жидкой фазы. На одном из заводов имел место случай, когда при прокатке на слябинге

все три цеха располагаются друг за другом (сталеплавильный, цех подготовки составов и блюминг). Суммарное время от конца разливки до посадки слитков в колодцы по заводской инструкции было таково, что к моменту посадки, согласно расчетам на ЭВМ, слиток уже полностью закристаллизовывается. Проведенные исследования показали, что наиболее приемлемым с точки зрения энергосбережения является посадка слитков через 100 мин после окончания разливки (рисунок 5). Это позволяет начинать нагрев слитков с небольшим количеством жидкой фазы в начальный момент. Выделение скрытой теплоты кристаллизации замедляет процесс охлаждения средних слоев слитка и приводит к более быстрому подъему температур в поверхностных слоях.

Как видно из рисунка 5, скорость снижения температуры середины слитка в этом случае гораздо меньше, чем в предыдущем (рисунок 2). При тепловой мощности ячейки 7,1 МВт время нагрева равно 2 ч 40 мин. Дальнейшее увеличение тепловой мощности ячейки до 10 МВт за счет увеличения расхода газа позволяет уменьшить время нагрева до 1 ч 50 мин.

В условиях сталеплавильно-прокатного производства завода наиболее благоприятной для осуществления энергосберегающей технологии обработки слитков является посадка металла в ячейки нагревательных колодцев через 100–105 мин после разливки. Большая длительность доставки ведет к прямым потерям тепла слитками и увеличению расходов топлива на нагрев. Примерные диаграммы нагрева приведены на рисунке 6.

Посадка слитков в ячейки колодцев ранее, чем через 100 мин от конца разливки, требует дальнейших исследований в части качества металла, а также очень тщательной проверки процесса изменения температуры по сечению слитка, т.к. полностью должна исключаться возможность подачи в прокатный стан слитка с наличием в нем жидкой фазы как по условиям технологии обработки металлов давлением, так и особенно по требованиям техники безопасности.

При проведении опытно-промышленных исследований по предложенной энергосберегающей технологии нагрева и прокатки слитков качество стали оценивали путем изучения дефектов макроструктуры и степени химической неоднородности на 32-х темплетах заготовок (квадрат 106 и 125 мм) отобранных от раскатов 14-ти слитков на горизонтах 12, 28 и 50% от верха слитка.* Степень химической неоднородности определяли по химическому анализу стружки, взятой при сверловке в трех точках темплетов. Оценку качества поверхности производили по ГОСТ 10243–75. Результаты исследований показали, что выбранное уменьшение длительности охлаждения слитков в изложницах, с момента окончания разливки до стрипперования, практически не влияет на

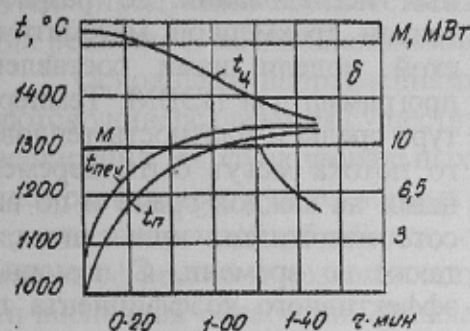
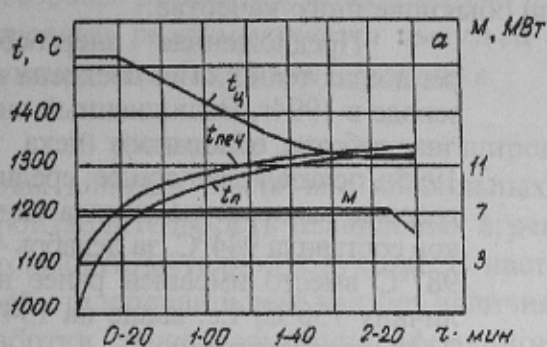


Рисунок 5 — Изменение температуры печи, поверхности и середины слитка в процессе нагрева при посадке через 100 мин после окончания разливки

* Работа выполнена при участии доцента Жук В.Л.

химическую неоднородность заготовок. Повышение при этом температуры посадки слитков в нагревательные колодцы от 860 до 1020°C не влияет на такие дефекты структуры, как точечная неоднородность и подкорковые пузыри. Средний балл ликвационного квадрата находится в пределах 0,7–1,7; подсадочной ликвации в пределах 0,2–0,7; центральной пористости 0,6–1,1 балла. Поверхность исследуемых темплетов была поражена в основном мелкими трещинами, пленами и волосовинами, величиной в пределах 0,5–2,0 балла. В целом макродефекты в исследованных темплетах находились в пределах, допускаемых ГОСТами для углеродистых марок стали обыкновенного качества.

Предложенная энергосберегающая технология внедрена на заводе в 1994г. Выполненный анализ работы обжимного цеха за 1995г. показал следующее: среднегодовая температура посадки слитков составила 944°C, за декабрь — 987°C вместо имевшей ранее величину 750°C, т.е. выше на 194 и 237°C соответственно.

В результате выполненных исследований по разработанной трехмерной математической модели нами составлена программа для ПЭВМ. Температура среды и плотность теплового потока могут быть переменными на каждой грани и по высоте изложницы или слитка, а также во времени. С помощью эффективного коэффициента теплопроводности учитывается наличие прибыльной надставки или теплоизоляционного вкладыша.

По разработанной математической модели могут быть созданы энергосберегающие технологические инструкции для других блюмингов и слябингов, а также системы АСУТП, работающие в режиме реального времени, и выдающие на цветной экран трехмерное распределение температур для любого слитка — раската в любой, наперед заданный, момент времени.

Список литературы

1. Lame, Clapeyron, *Ann. de Chimie et de Physique* 47, 250, 1891.
2. Stefan, *Monatsschifte fur Mathem. und Phys.* 1, 1, 1890.
3. Chworinoff N.I. *Theorie der Erstarrung von Gussstucken, die Giesserei*, 1940. — № 10, 11, 12.
4. Тагеев В.М., Гуляев Б.Б. Затвердевание стального слитка. — *Металлург*, 1939. — № 8.
5. Иванцов Г.П. Теплообмен между слитком и изложницей. — *Металлургиздат*, 1951.
6. Вейник А.И. Теплообмен между слитком и изложницей. — М.: ГНТИЛЦДМ, 1959. — 358 с.
7. Самойлович Ю.А. Формирование слитка. — М.: *Металлургия*, 1977. — 160 с.
8. Казанцев Е.И., Котляревский Е.М., Баженов А.В., Заварова И.О. Энергосберегающая технология нагрева слитков. — М.: *Металлургия*, 1992. — 176 с.
9. Темник А. В., Куликов И .В., Казанцев Е.И. Трехмерный расчет процесса затвердевания слитка // *Известия АН СССР. Металлы*, 1984. — № 5. — С. 86–87.

© Казанцев Е.И., Гинкул С.И., 1999.

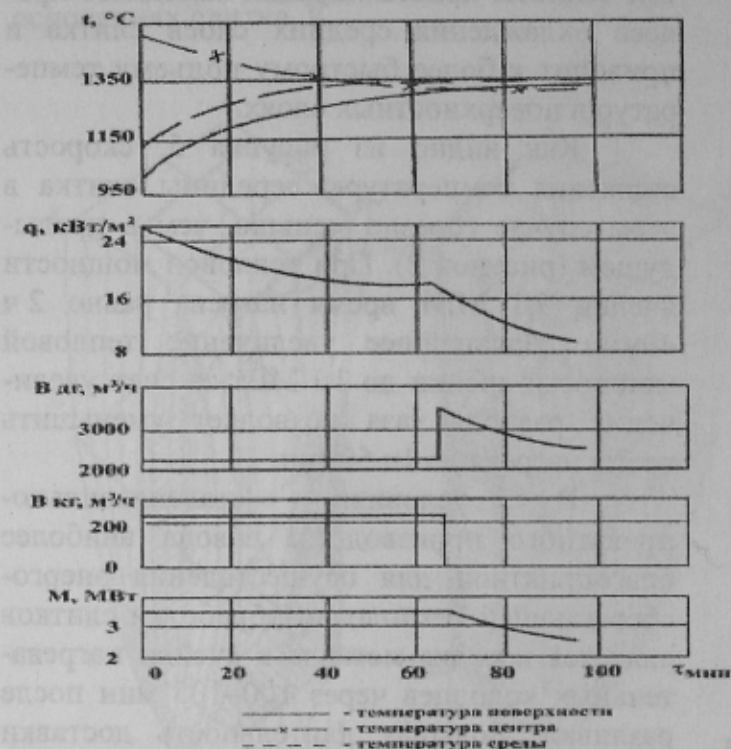


Рисунок 6 — Диаграммы процесса нагрева (период охлаждения 105 мин): q — тепловой поток; $V_{дг}$ — расход доменного газа; $V_{кг}$ — расход коксового газа; M — тепловая мощность