

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫДЕРЖКИ В ИЗЛОЖНИЦАХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ МАССОЙ 24-51 Т

Е.А. Казачков, В.С. Макуров (ПГТУ, г. Мариуполь)

*Расчетным путем с использованием экспериментальных данных установлена продолжительность затвердевания и температура поверхности крупных кузнечных слитков массой 24-51 т, что позволило предложить сокращенные нормативы их выдержки в изложницах*

Модернизация энергетического комплекса Украины, в особенности атомных электростанций, требует производства крупных кузнечных слитков повышенного качества массой до 200 т.

Одной из важнейших задач при производстве крупных кузнечных слитков является разработка режимов их затвердевания, охлаждения и нагрева под прокатку. Такие режимы, установленные на основании производственного опыта не являются энергетически выгодными, т.к. предполагают чрезмерное охлаждение, а затем большие затраты энергии и времени на нагрев слитков. С этой точки зрения весьма желательно сокращение времени выдержки в изложницах и транспортировки слитков.

Ввиду того, что кузнечные слитки транспортируют в горизонтальном положении, выдержка их в изложницах не должна быть меньше времени полного затвердевания.

С другой стороны, выдержка сверх этого времени для крупных слитков может привести к образованию продольных трещин, если температура поверхности становится меньше 800°C [1].

В процессе транспортировки происходит дальнейшее понижение температуры поверхности слитка, в результате чего перед посадкой в печь она может оказаться ниже некоторой критической температуры, при которой ускоренный нагрев крупных кузнечных слитков, как показано в работе [2], приводит к образованию трещин, а иногда к их полному разрушению - поперечному расколу на две части.

Таким образом, определение времени полного затвердевания слитков и установление зависимости температуры поверхности слитка от времени выдержки в изложнице представляется достаточно важной задачей.

Применяемые с этой целью экспериментальные методы исследования процесса кристаллизации затвердевших слитков требуют их разрушения, что приводит к большим материальным затратам, а длительное исследование

дование поля температур при охлаждении затвердевающих слитков практически неосуществимо.

Широкое распространение современных компьютеров позволяет применять методы математического моделирования, которые в определенном смысле позволяют заменить натурные эксперименты численными. Последние можно реализовать быстрее, проще и дешевле. Применительно к расчетам теплового состояния стальных слитков известно достаточно большое число таких моделей, например описанных в работах [3-5] и др. Однако, известные модели используют ряд упрощающих допущений, которые не позволяют реализовать преимущества вычислительной техники и получать результаты, имеющие практическую ценность.

Целью настоящей работы является разработка и практическое применение для тепловых расчетов затвердевания крупных кузнечных слитков усовершенствованной модели, в которой используются экспериментальные данные.

Предлагаемая математическая модель отличается от известных введением в расчет экспериментальных данных энтальпии стали в области двухфазного состояния и данных по изменению температуры наружной поверхности изложницы, что позволило существенно упростить математическую формулировку задачи и в то же время учесть ряд факторов, сопровождающих затвердевание промышленных слитков. Расчет основан на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных, которое в цилиндрической системе координат, принятой для восьмигранного слитка, при условии нестационарных тепловых потоков имеет вид:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\lambda}{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где  $H$  – энтальпия единичного объема вещества в зависимости от температуры;  $T$  – температура в точке слитка (изложницы) с координатами  $(x, y)$  в момент времени  $\tau$ ;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность.

Уравнение (1) содержит в левой части член энтальпии, который вводит в валовой форме тепловые потери от охлаждения металла и тепловые выделения, вызываемые затвердеванием. Если имеется экспериментальная кривая энтальпия-температура, то этот член достаточен для математического решения задачи без необходимости введения в расчет дополнительных условий, характеризующих процесс затвердевания. Экспериментальную кривую энтальпия-температура для среднеуглеродистой стали принимали по данным работы [5].

Экспериментальные исследования динамики образования газового зазора с помощью стержня, вводимого в отверстия изложницы, показали, что ширина зазора за короткое время (5-10 мин) достигает нескольких

миллиметров. В таких условиях количество теплоты, отдаваемое через зазор путем теплопроводности, становится незначительным.

На основании принятых допущений процесс распространения тепла в слитке и изложнице представили обобщенным дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \bar{a} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от центра слитка,  $\bar{a}$  – обобщенная температуропроводность: для слитка  $\bar{a}_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_{\text{э}}}$ , для изложницы  $\bar{a}_u = \frac{\lambda_u}{\rho_u c_u}$ , при этом эффективная теплоемкость  $c_{\text{э}}$  рассчитывается на основании экспериментальной кривой энтальпия – температура.

Уравнения (2) решали методом конечных разностей при граничных условиях первого рода, в качестве которых использовали экспериментальные данные по температуре наружной поверхности изложницы, взятые из работы [6].

По отработанной программе была проведена серия расчетов процесса затвердевания кузнечных слитков массой 24; 31; 51 т. Изменение температуры на поверхности изложниц задавали в виде полинома четвертой степени, коэффициенты которого определяли путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Применение граничных условий первого рода позволило с большой точностью учесть условия теплообмена в системе слиток – изложница – окружающая среда.

Температурная зависимость теплопроводности, теплоемкости и энтальпии стали и чугуна (изложница) принималась по данным работы [5].

На рис. 1 показано распределение температуры по радиусу 31,4 т кузнечного слитка и по толщине стенки изложницы на уровне 2/3 высоты в процессе кристаллизации, полученное расчетом. Температуру изложницы принимали однородной по толщине и равной температуре ее наружной поверхности.

Исследуемый слиток имеет соотношение  $H/D < 2$  и оканчивает кристаллизацию в вертикальном направлении. Поэтому полную картину затвердевания 31,4 т кузнечного слитка получили расчетно-экспериментальным способом, согласно которому продвижение горизонтального фронта затвердевания определяли расчетом, а продвижение вертикального фронта – зондированием. Изохроны кристаллизации приведены на рис.2. Время полного затвердевания слитка согласно представленным данным составляет порядка 7 часов.

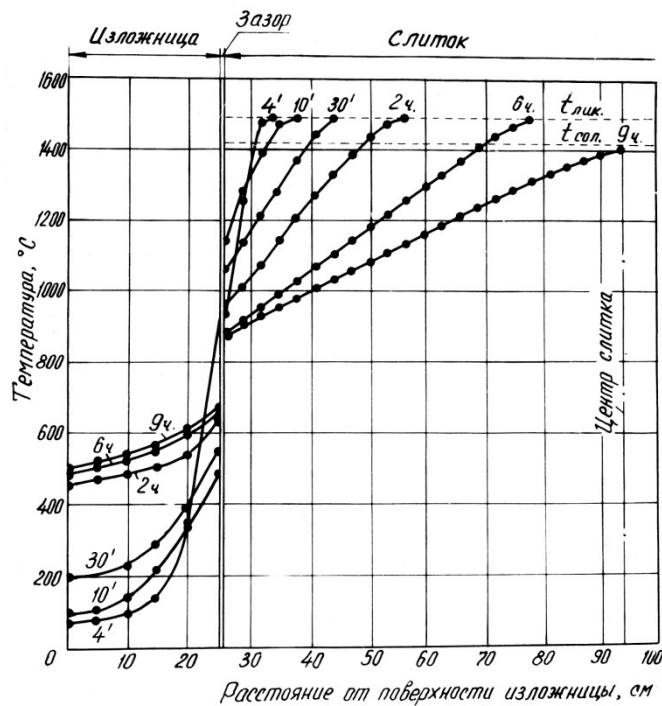


Рисунок 1 – Температурное поле в поперечном сечении (на уровне 2/3 высоты) 31,4-т восьмигранного слитка углеродистой стали и изложницы в процессе затвердевания, полученное расчетом на ЭВМ

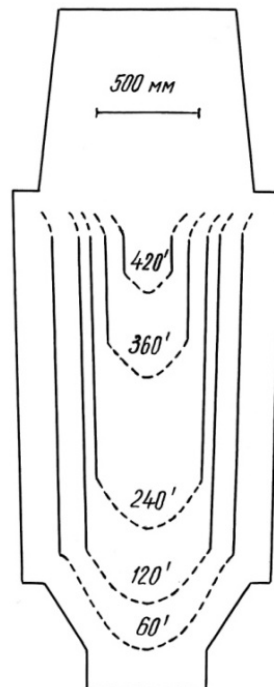


Рисунок 2 – Изохроны затвердевания кузнечного слитка массой 31,4 т (сплошными линиями показаны данные расчета на ЭВМ, пунктиром - данные вертикального зондирования слитка)

Подобные расчеты были выполнены для кузнечных слитков массой 24 и 51 т, результаты обобщены на рис. 3. Здесь показаны кривые продвижения фронта затвердевания, отвечающие 40 % твердой фазы (А), и изменения температуры поверхности исследуемых слитков (Б) для горизонтального сечения на уровне 2/3 высоты слитков.

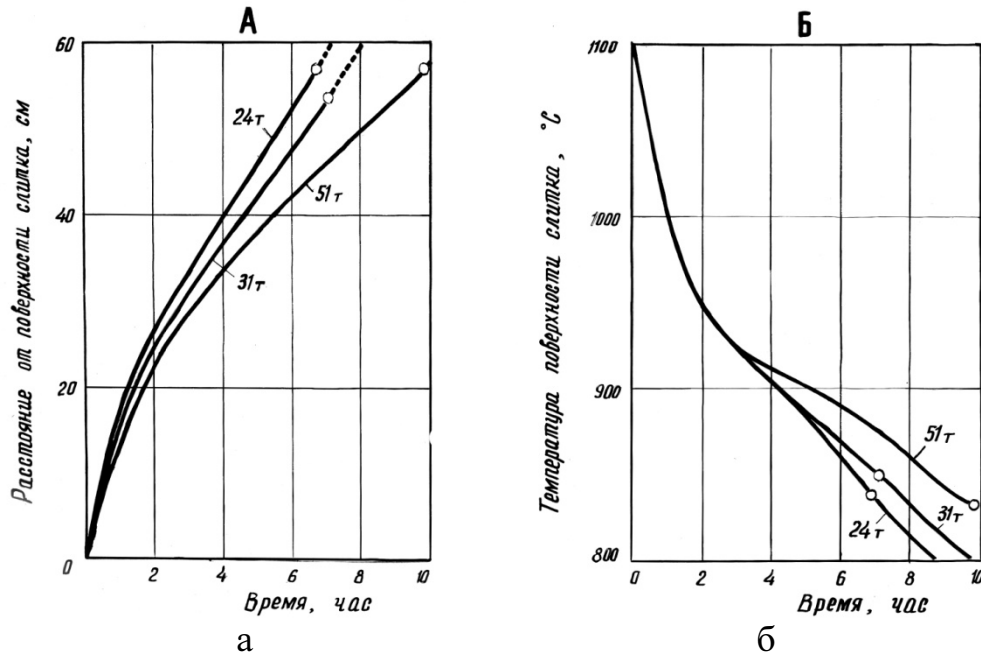


Рисунок 3 – Продвижение фронта затвердевания (А) и изменение температуры поверхности (Б) крупных кузнечных слитков (цифры у кривых – масса слитков, т)

Интересно отметить, что изменение температуры поверхности идентично для слитков различной массы на начальном этапе затвердевания. Очевидно, это связано с интервалом времени, в течение которого аккумулирующая способность не успевает уменьшиться и изложница служит своеобразным холодильником, поддерживающим одинаковое изменение температуры на поверхности слитков различной массы. Кривые продвижения фронта затвердевания для трех слитков практически сливаются на участке соответствующем первому часу кристаллизации. На этом этапе затвердевание всех трех слитков может быть описано одним уравнением квадратного корня, однако на последующем этапе ход кривых имеет различный характер. Необходимо отметить, что исследуемые слитки имеют  $H/D \approx 1,5$  и оканчивают кристаллизацию в вертикальном направлении [1]. Вертикальное затвердевание стальных слитков является сложным физико-химическим процессом, для математического описания которого недостаточно решения уравнений теплопередачи. Поэтому кривые продвижения фронта горизонтального затвердевания на рис.3 были ограничены временем вертикальной кристаллизации, полученным обобщением эксперимен-

тальных данных приведенных в работе [1]. Пунктирные линии имеют формальный характер.

Из графиков найдена температура поверхности слитков, соответствующая времени полного затвердевания, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Время полного затвердевания и температура поверхности крупных кузнечных слитков

| Масса слитка, т | Время полного затвердевания согласно расчету, ч | Температура поверхности к концу затвердевания, °С | Время выдержки в изложницах по заводской технологии, ч |
|-----------------|---|---|--|
| 24              | 6,9   | 837   | 7,5  |
| 31              | 7,1   | 848   | 8,0  |
| 52              | 9,8   | 832   | 11,0   |

Из приведенных данных следует, что выдержка в изложницах крупных кузнечных слитков может быть сокращена примерно на час, по сравнению с нормативами, установленными технологической инструкцией.

Температура поверхности исследованных слитков к концу затвердевания стремится к 800 °С, поэтому выдержка их в изложницах во избежание образования трещин не должна превышать времени полного затвердевания. При соблюдении последнего условия для сохранения достаточно высокой температуры поверхности слитков перед нагревом необходимо принимать меры к снижению тепловых потерь при транспортировке, например перевозить слитки в вагонах-термосах.

### Литература

1. Скобло С.Я. Слитки для крупных поковок / С.Я. Скобло, Е.А. Казачков. – М.: Metallurgy, 1973. – 248 с.
2. Залесский В.И. Определение времени выдержки в изложницах крупных кузнечных слитков / В.И. Залесский, Д.М. Корнеев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. - №8. – С. 9-11.
3. Sarjant R.J. Internal temperature Distribution in the Cooling and Reheating of Steel Ingots/ R.J. Sarjant, M.R. Slack//Journal of the Iron and Steel Inst. - 1954. – Part 4, №8. – P. 428-444.
4. Самойлович Ю.А. Определение продолжительности затвердевания крупных кузнечных слитков/ Ю.А. Самойлович, В.С. Кошман // Разливка стали в слитки и их качество: Сб. науч. тр. - №8. – М.: Metallurgy, 1979. – С. 52-53.
5. Kohn A. L'étude mathématique de la solidification des lingot de poids de 12 tons en las et moyenne toneuv du carbon / A. Kohn, G. Morillon // Rev. de Metallurgie. – 1965. - V. 62, № 4. - P.321-338.
6. Исследование тепловой работы изложниц для кузнечных слитков / Е.А. Казачков, С.Я. Скобло, Ю.И. Кирышкин и др. / Производство и обработка стали: Сб. науч. тр. ЖДМИ. – М.: Metallurgizdat, 1960. – С. 68-109.

© Казачков Е.А., Макуров В.С. 2007