



*The main indices of process of the ingots and slugs tilting in circular furnaces are examined and the mathematical model of metal heating which includes calculation of temperatures and thermal stresses in the cut of heated metal with the purpose of estimation of tilting influence on the temperatures and thermotensions dynamics is worked out.*

*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси, Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП "Платан", Россия,  
И. А. ТРУСОВА, Д. Н. АНДРИАНОВ, БНТУ*

УДК 669.187

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАНТОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В КОЛЬЦЕВЫХ ПЕЧАХ. Сообщение 1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В трубном производстве при нагреве цилиндрических заготовок перед последующей прошивкой наибольшее распространение получили кольцевые печи. Нагреваемые заготовки располагаются на поду печи с определенным зазором, что обеспечивает достаточно равномерное поле температур по сечению заготовок [1, 2]. Вместе с тем при нагреве заготовок большого диаметра наблюдается неравномерность поля температур по их сечению, что вызывает необходимость увеличения продолжительности нагрева слитков, снижая технико-экономические показатели процесса нагрева металла перед последующей пластической деформацией. Следует также учитывать то немаловажное обстоятельство, что при нагреве слитков большого диаметра с холодного посада происходит значительное захлаживание подины на участке загрузки, в результате чего по высоте слитков длительное время сохраняется высокая неравномерность температурного поля. К этому следует добавить, что несимметричность температурного поля по сечению заготовки увеличивается при длительной эксплуатации печей, т.е. при нагреве заготовок в условиях деформированной подины, что в конечном итоге может привести к возникновению дефектов уже на стадии прошивки заготовки.

Изложенное выше свидетельствует о необходимости рассмотрения процедуры кантования слитков в процессе нагрева. Следует отметить, что вопрос о процессах кантования металла в кольцевых печах не нашел должного отражения, о чем свидетельствуют немногочисленные научные публикации [3–8].

В монографии Н.Ю. Тайца [2] изложены некоторые соображения о режиме кантования заготовок в ролевых печах. При этом приведены результаты экспериментального изучения температурного поля слитков диаметром 360 мм из углеродистой стали при их нагреве в ролевой печи с использованием процедуры кантования и

впервые показано наиболее отличительное свойство поля температур в кантуемых заготовках, а именно «переплетение» температурных кривых, характеризующих температуру верхней и нижней точек в сечении заготовки. Автором установлено, что для равномерного нагрева слитков в ролевых печах кантование слитков целесообразно осуществлять на 180°.

В статье М.Я. Пекарского и Н.Ю. Тайца [3] впервые продемонстрировано использование математической модели для изучения динамики поля температур в слитках цилиндрической формы при их кантовании. В результате расчетов установлено, что наиболее эффективно кантование слитков, лежащих на подине вплотную друг к другу (при этом зафиксировано сокращение продолжительности нагрева слитков на 40%), при расположении слитков с зазором, равным диаметру и более, продолжительность нагрева сокращается не более чем на 10%. Заслуживает внимания замечание автора статьи [3] о том, что «кантование слитков в методической зоне с точки зрения сокращения продолжительности нагрева нецелесообразно при любой величине зазора, но может иметь смысл только в случае нагрева сталей, склонных к трещинообразованию, так как при небольшом расстоянии между слитками температурный перепад заметно уменьшается».

Целесообразность процесса кантования заготовок большого диаметра и характер его влияния на производительность печи в различных технологических зонах рассмотрены в [4]. В последующих исследованиях В.И. Тимошпольского и др. [5–8] разработана математическая модель нагрева слитков в кольцевых печах, учитывающая влияние подины, и установлены закономерности изменения поля температур в заготовках цилиндрической формы в ходе кантования. Выполнены серии расчетов по определению наиболее эффективного угла кантования (от 0 до 180°) и выбору опти-

мального места расположения кантовочной машины. Расчеты проведены для условий нагрева заготовок (сталь 45) диаметром 0,23 и 0,27 м в кольцевой печи стана 250 Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского. Доказано, что наименьший температурный перепад по сечению заготовки достигается при кантовании заготовки во второй половине сварочной зоны. При сопоставлении эффективности процедуры кантования при повороте заготовки на 90 или 180° авторы работ пришли к однозначному выводу, что наиболее эффективным является кантование на 180°. Следует отметить, что одна из важнейших рекомендаций относительно необходимого угла поворота заготовки при кантовании оказалась общей для ролевых и кольцевых печей.

Обсуждение материалов [3–8] позволяет определить две основные задачи для анализа режимов нагрева стальных слитков в процессе кантования:

- определение возможного резерва повышения производительности кольцевой печи за счет организации процесса кантования слитков;
- выявление возможности снижения неравномерности температур по сечению слитков, а также снижения возникающих в слитке термических напряжений за счет кантования.

В настоящей статье рассмотрены основные показатели процесса кантования слитков и заготовок в кольцевых печах и разработана математическая модель нагрева металла, включающая расчет температур и термических напряжений в сечении нагреваемого металла с целью оценки влияния кантования на динамику температур и термонапряжений.

При постановке математической задачи нагрева цилиндрических заготовок базировались на принципах математического моделирования, используемых в работах [5–8], которые учитывали дополнительные и весьма существенные факторы, отражающие специфику нагрева металла в кольцевых печах (роль нагретой подоины, кантование заготовок). Вместе с тем приведенная ниже математическая модель отличается учетом новых элементов [9]:

- совместное решение задачи нестационарной теплопроводности и термоупругости для стальных заготовок круглого сечения;
- введение в модель двух видов теплоносителя (греющих газов и нагретой подоины), характеризующихся двумя парами показателей – температур греющей среды и подоины, коэффициентов теплообмена излучением и конвекцией;
- использование аналитических (эмпирических) формул для описания зависимости температур греющей среды от времени и зависимости теплофизических свойств стали от температуры. При определении теплофизических свойств стали (теплопроводности и истинной теплоемкости) учитывали структурные превращения в стали при

ее нагреве, что позволило установить новые закономерности для различных марок стали [9];

- использование метода конечных элементов при описании поля температур и термических напряжений в нагреваемых заготовках;
- новый алгоритм трансформации температурного поля заготовок при описании технологического процесса кантования.

Отметим, что в математической модели используется декартова система координат, что представляется более удобным по сравнению с цилиндрической системой.

Математическая формулировка задачи теплопроводности включает в себя базовое уравнение

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

дополненное граничными условиями для верхней части заготовок, обращенных к своду, боковым стенам печи и потоку продуктов сжигания топлива

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{верх}} = \sigma_b(T_b^4 - T_n^4) + \alpha_b(T_b - T_n), \quad (2)$$

для нижней части заготовок, воспринимающих тепло от нагретой подоины печи:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{низ}} = \sigma_n(T_n^4 - T_b^4). \quad (3)$$

Учитывая значительную протяженность нагреваемых заготовок вдоль продольной оси по сравнению с размерами поперечного сечения, использована гипотеза плоской деформации нагреваемых изделий, что позволяет сократить размерность соответствующей задачи теории упругости. При этом предполагается, что компонента тензора деформаций, направленная вдоль продольной оси ( $\epsilon_z$ ), не зависит от координат  $x$ ,  $y$  в поперечном сечении заготовки и основные соотношения оставшихся компонент тензора деформаций ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$ ) связаны с компонентами тензора главных напряжений ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ) соотношениями

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = D \left( \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{bmatrix} (1+\mu)(T-T_0) \right), \quad (4)$$

где  $D$  – тензор упругих констант материала:

$$D = \frac{E(T)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Базовые уравнения термоупругости (4), учитывающие наличие нестационарного поля температур, дополняются условиями равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = K_x, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = K_y, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = K_z,$$

где  $K$  – вектор объемных сил.

При решении задачи термоупругости используется предположение об отсутствии внешних нагрузок на заготовку, а на границах расчетного поперечного сечения заготовки принято условие обращения в нуль соответствующих компонент тензора напряжений. В общем случае задача решается с учетом температурной зависимости модуля упругости материала заготовки.

Для формализации процедур кантования слитков и заготовок при математическом моделировании введены некоторые показатели процесса кантования. Кантование заготовок осуществляется внешними механическими устройствами путем ряда последовательных операций поворота заготовок на определенный угол  $\alpha$ . На рис. 1 показаны примеры поворота заготовок на угол  $90^\circ$  (а) и  $180^\circ$  (б). Для единичной операции поворота заготовок введем понятие «каскада кантования». Тех-

нологический процесс кантования заготовок можно описать в математической модели нагрева металла путем размещения набора каскадов кантования в различных зонах нагревательной печи. В качестве примера на рис. 2 представлена схема размещения двух каскадов кантования (CS1, CS2) в конце методической зоны, а также двух каскадов (CS3, CS4) в томильной зоне кольцевой печи (диаметр нагреваемых заготовок 520 мм). Каждый каскад кантования характеризуется следующими показателями: местом расположения в рабочем пространстве печи (или расположением вдоль шкалы времени в предположении о неизменной средней скорости перемещения заготовок); интервалом времени кантования ( $\Delta t_k$ ); значениями показателей греющей среды (температуры печных газов или обмуровки внутренней поверхности печных стенок, приведенным коэффициентом теплообмена излучением на данном участке печного пространства); углом поворота заготовок. Для схемы, приведенной на рис. 2, приняты следующие показатели четырех каскадов кантования (см. таблицу), при этом:

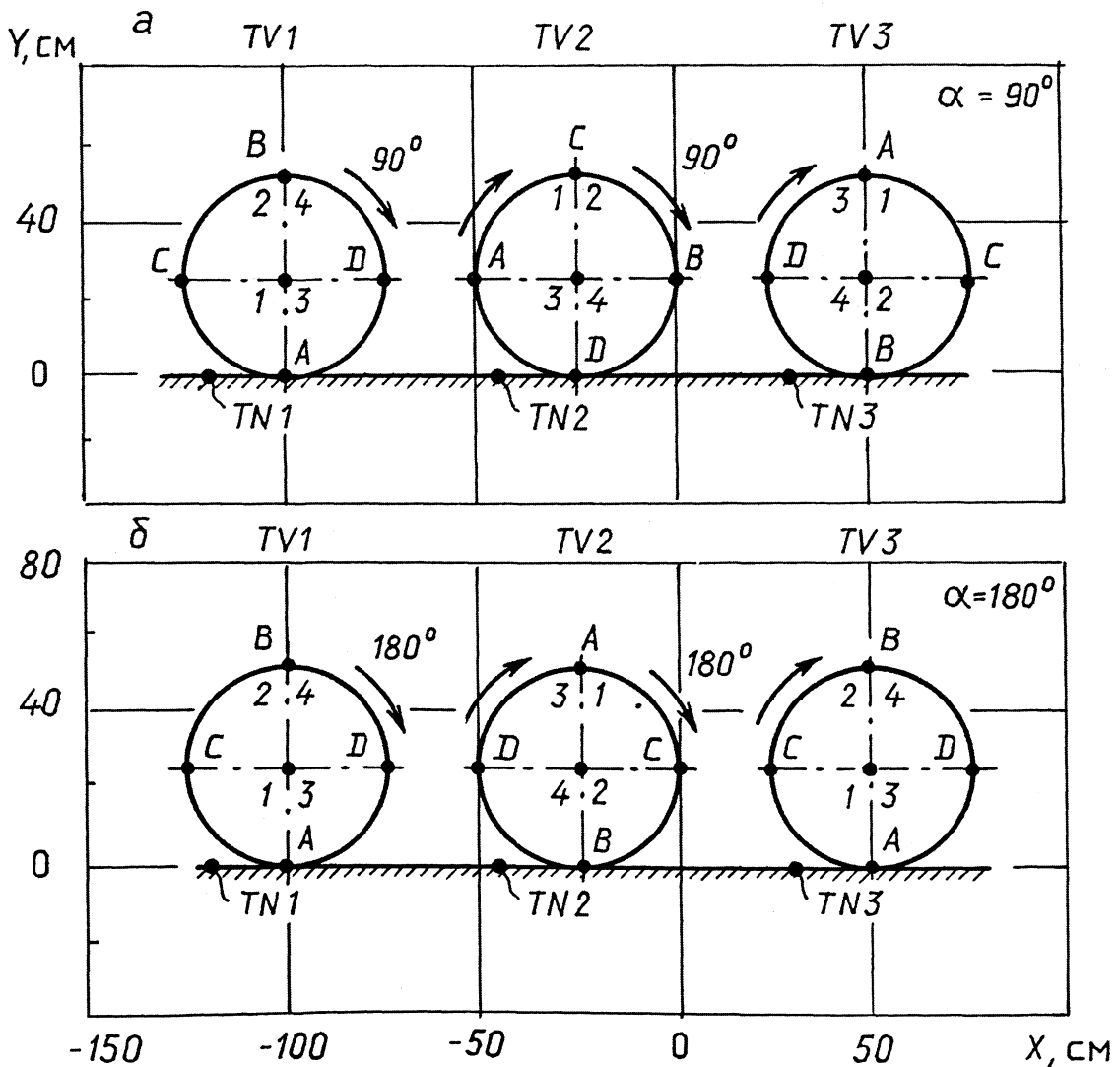


Рис. 1. Схемы кантования при повороте заготовок на  $90^\circ$  (а) и  $180^\circ$  (б)

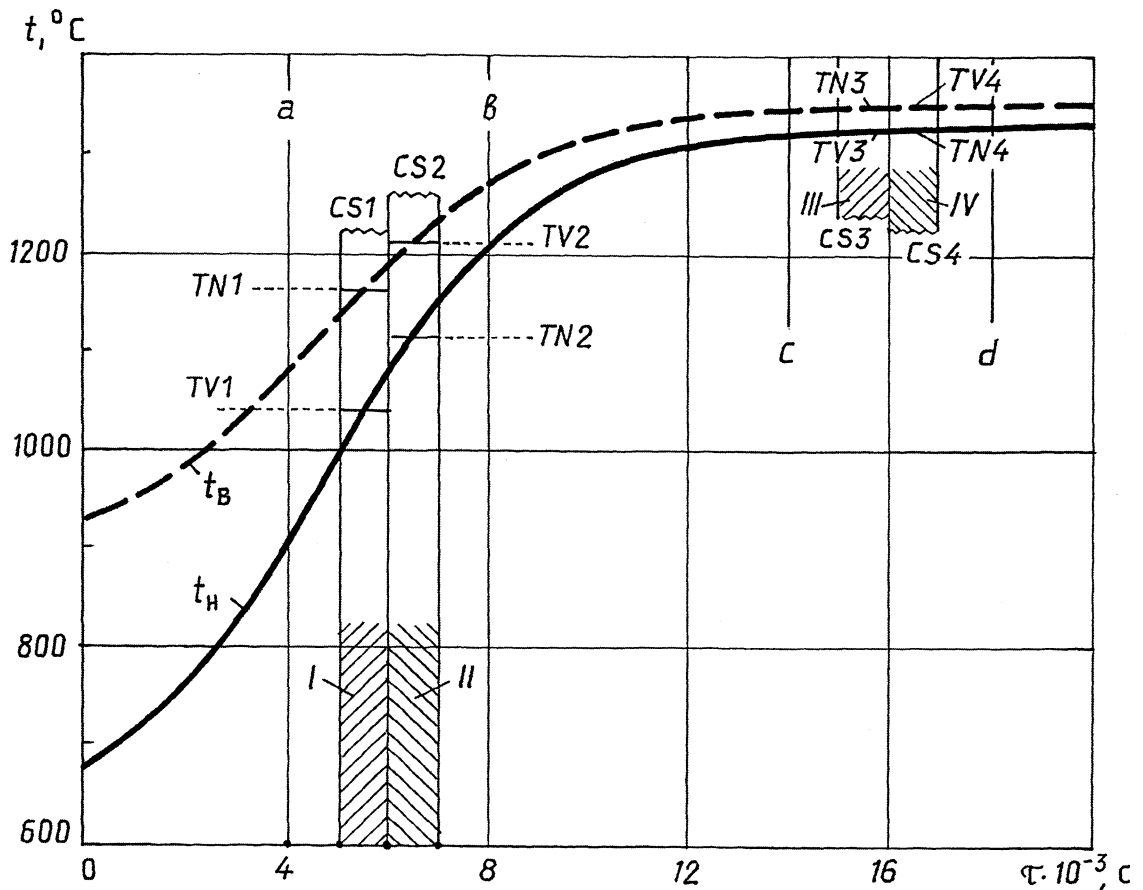


Рис. 2. Пример размещения каскадов кантования в конце методической зоны (участок А – В) и в томильной зоне печи (участок С – D)

**Показатели каскадов кантования цилиндрических заготовок**

Номер каскада	Обозначение каскада	Момент поворота заготовок, с	Температура греющей среды, °С(К)	
			верх	низ
1	CS1	5000	1172 (1445)	1067 (1340)
2	CS2	6000	1217 (1490)	1122 (1395)
3	CS3	15000	1360 (1633)	1340 (1613)
4	CS4	16000	1360 (1633)	1345 (1618)

- длительность каждого каскада кантования в данном случае принята равной 500 с, угол кантования 180°;

- поперечное сечение заготовки условно разделяется на четыре участка, два из которых (1, 3) обращены к обмуровке пода печи, а два других (2, 4) – к потоку греющих газов;

- положение заготовки после поворота на заданный угол изменяется без учета потерь времени на процедуру поворота;

- в пределах интервала кантования для каждого каскада используются неизменные значения температур греющей среды и приведенных коэффициентов теплообмена излучением;

- в качестве температуры греющей среды приняты опирающиеся на анализ данных термометрирования функционирующих кольцевых печей значения температур обмуровки пода печи

(для участков 1 и 3) и температур греющих газов в рабочем пространстве печи (для участков 2 и 4);

- конкретные значения указанных выше показателей подбираются с учетом принятых графиков изменения во времени температур греющей среды (рис. 2), при этом во всех случаях учитывается реально существующее различие между температурой факела (греющих газов печи) и температурой обмуровки пода, особенно сильно проявляющееся в зоне посада холодных заготовок в печь.

Таким образом, разработана физико-математическая модель расчета температурных полей и термических напряжений при нагреве цилиндрических заготовок в кольцевых печах, учитывающая специфику процесса нагрева (роль нагретой подины, кантование заготовок на различный угол, возникающие в металле термические напряжения

и др.), которая может быть использована для выполнения расчетов при совершенствовании тепловой работы кольцевых печей и проектировании новых агрегатов, обеспечивающих высокое качество подготовки заготовок к прошивке и прокатке за счет симметричности нагрева металла.

### Литература

1. Григорьев В.Н. Кольцевые печи для нагрева металла. М.: Metallurgizdat, 1958.
2. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Metallurgizdat, 1962.
3. Пекарский М.Я., Тайц Н.Ю. Влияние расположения и кантования цилиндрических слитков в процессе нагрева на производительность печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1970. №8. С. 143–148.
4. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Пекарский М.Я. Кольцевые печи (теория и расчеты). Мн.: Выш. шк., 1993.
5. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Козлов СМ. Влияние кантования на нагрев цилиндрических заготовок с изменяющимися по периметру граничными условиями в кольцевых печах осепрокатного производства // Литье и металлургия. 1999. №4. С. 35–37.
6. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Козлов СМ. Тепловые процессы при несимметричном нагреве слитков и заготовок перед прокаткой // ИФЖ. 2000. Т.73, № 6. С. 1324–1328.
7. Стальной слиток. В 3-х т. Т.3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова и др. Под общ. ред В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
8. Теплотехнический анализ несимметричного нагрева и кантования цилиндрических заготовок в пламенных кольцевых печах / О.В. Дубина, В.И. Тимошпольский, СМ. Козлов, И.А. Трусова // Сб. науч. тр.: Металлургическая тепло-техника. Днепропетровск, 2001. Т.4. С. 162–167.
9. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А., Хопова О. Г. Теплофизические процессы при нагреве металла в кольцевых печах // Литье и металлургия. 2005. №2. Ч.2. С. 67–72.