

The results of the study of regularity of the temperature field and thermal stresses field changing on cut of the ingot at using of tilting procedure in annular furnaces are given in the present article.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,  
Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан», Россия,  
И. А. ТРУСОВА, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 669.187

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАНТОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В КОЛЬЦЕВЫХ ПЕЧАХ. Сообщение 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАГРЕВЕ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛИ

Вопросы исследования кантования цилиндрических заготовок при нагреве их в кольцевых печах представляют значительный интерес в связи с повышенными требованиями к качеству нагрева металла в трубопрокатном и осепрокатном производствах и необходимостью симметричного нагрева заготовок перед последующей прошивкой. Как отмечено в работе [1], несмотря на актуальность таких исследований, вопрос о процессах кантования металла в кольцевых печах не нашел должного отражения, о чем свидетельствуют немногочисленные научные публикации [2–7].

В настоящей статье приведены результаты изучения закономерностей изменения температурного поля и поля термических напряжений по сечению заготовки при использовании процедуры кантования в кольцевых печах, базирующиеся на использовании сформулированной в работе [1] математической модели. Результаты определения характеристик температурного поля и поля термических напряжений в сечении слитков диаметром 520 мм получены при задании двух режимов кантования – трех- и пятикаскадного (табл. 1, 2).

Таблица 1. Показатели трехкаскадного режима кантования слитков

Обозначение каскада	Момент поворота слитков, с	Температура греющей среды, К	
		верх	низ
CS1	4000	1300	1385
CS2	6000	1500	1480
CS3	8000	1523	1543

Таблица 2. Показатели пятикаскадного режима кантования слитков

Обозначение каскада	Момент поворота заготовок, с	Температура греющей среды, К	
		верх	низ
CS1	4000	1300	1385
CS2	6000	1500	1480
CS3	8000	1523	1543
CS4	10000	1543	1523
CS5	12000	1523	1543

Начальный участок нагрева слитков в методической зоне печи представлен линейной зависимостью температуры греющей среды от времени, вплоть до момента  $t = 4000$  с. Далее, согласно данным табл. 1, осуществляется трехкратный поворот слитков на  $180^\circ$  при соблюдении интервалов  $\Delta t_k = 2000$  с.

Включение в расчеты двух режимов кантования (три или пять каскадов) обусловлено изучением двух ожидаемых от кантования эффектов – возможного снижения уровня термических напряжений и возможного сокращения длительности нагрева слитков, т.е. повышения производительности печи.

Соответственно выполнено и расположение каскадов кантования слитков вдоль шкалы времени: для первого из указанных эффектов каскады кантования расположены начиная с моментов образования на оси слитков максимальных растягивающих напряжений; для изучения второго из ожидаемых эффектов к первым двум каскадам добавлены еще два каскада кантования по 2000 с каждый. Учитывая предварительный характер выполняемого расчетного анализа, нет оснований для привязки временной шкалы каскадов кантования к неким конкретным участкам кольцевой печи. Ориентировочно можно указать на то, что основные участки кантования слитков размещены в сварочной зоне кольцевой печи и частично охватывают томильную зону (при использовании в расчетах пяти каскадов кантования).

На рис. 1–3 представлены результаты расчетов при задании полной длительности нагрева слитков  $t_k=20\ 000$  с при значениях приведенных коэффициентов теплообмена излучением  $\sigma_b=3\cdot 10^{-8}$  и  $\sigma_{II}=0,5\cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) и ступенчатом графике изменения температур греющей среды. При сопо-

ставлении графиков рис. 1, а, полученных с учетом кантования слитка, с данными, полученными без учета кантования, можно сделать вывод о том, что процедура кантования весьма существенно (в 2,0–2,5 раза) уменьшает неравномерность температур по сечению слитка во время попадания его в сварочную зону печи при значениях времени  $t = 6000\text{--}12\ 000$  с. Процесс выравнивания температур по сечению слитка при использовании кантования соблюдается вплоть до момента окончания нагрева слитка: максимальное значение разности температур по сечению слитка при  $t_k=20\ 000$  с составляет 85 град, в то время как при нагреве без кантования указанное значение разности температур составляло 147 град.

Весьма специфическим следует признать воздействие процедуры кантования на возникающие в слитке термические напряжения. Как видно из рис. 1, б, максимальные значения компоненты  $\sigma_x$  тензора напряжений на оси слитка составляют  $\sim 190$  МПа, что всего лишь на 8–10% ниже уровня напряжений при аналогичном режиме

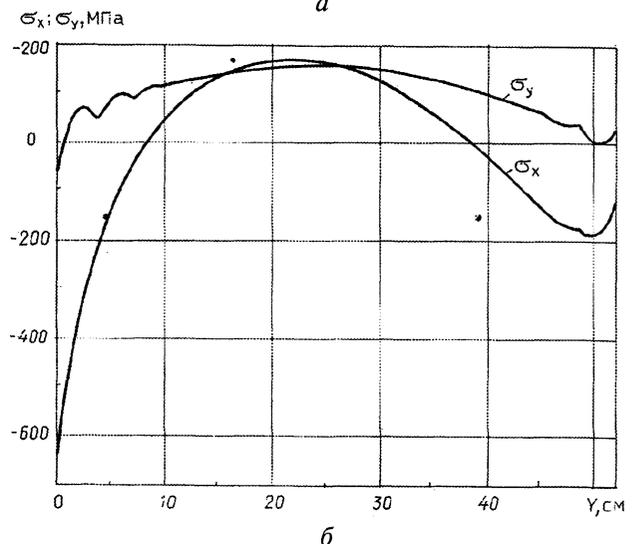
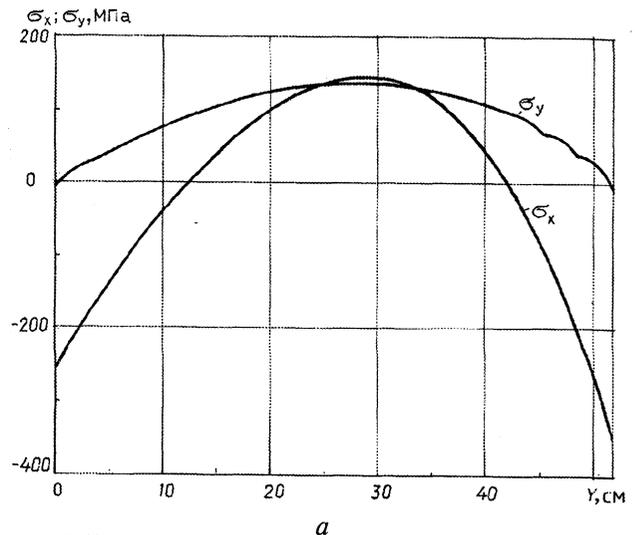
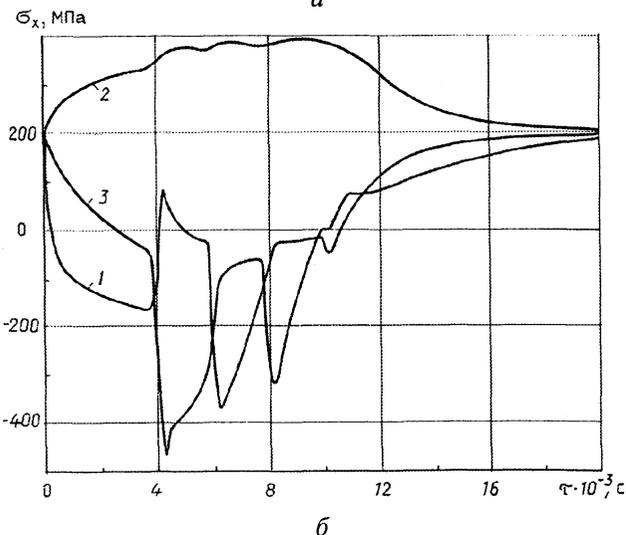
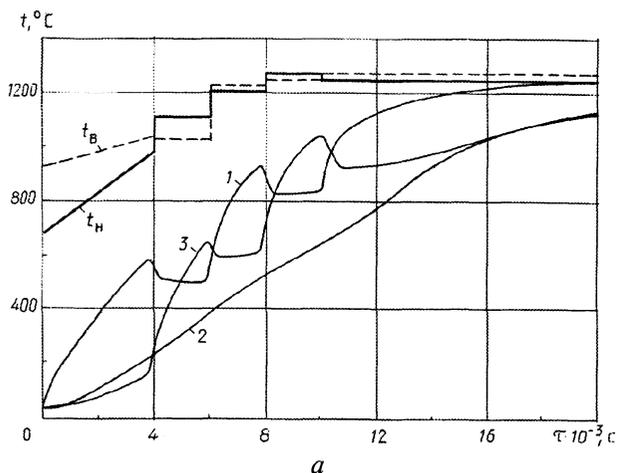


Рис. 1. Изменение во времени температур (а) и компоненты  $\sigma_x$  тензора напряжений (б) в характерных точках сечения слитка (1, 2, 3) при трехкаскадном режиме кантования при задании  $\sigma_b=3\cdot 10^{-8}$  и  $\sigma_{II}=0,5\cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $t_k=20\ 000$  с,  $\Delta t_k=2000$  с

Рис. 2. Распределение компонент  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  тензора напряжений вдоль оси Y при нагреве по режиму, указанному на рис. 1, для момента времени  $t=3800$  с (а) и  $t=4200$  с (б)

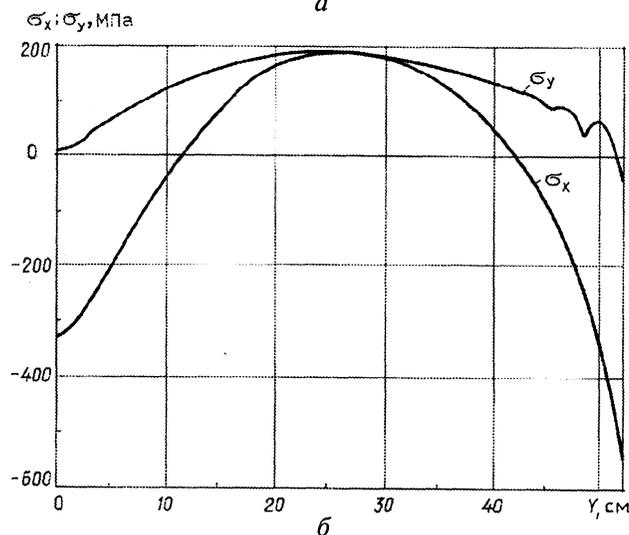
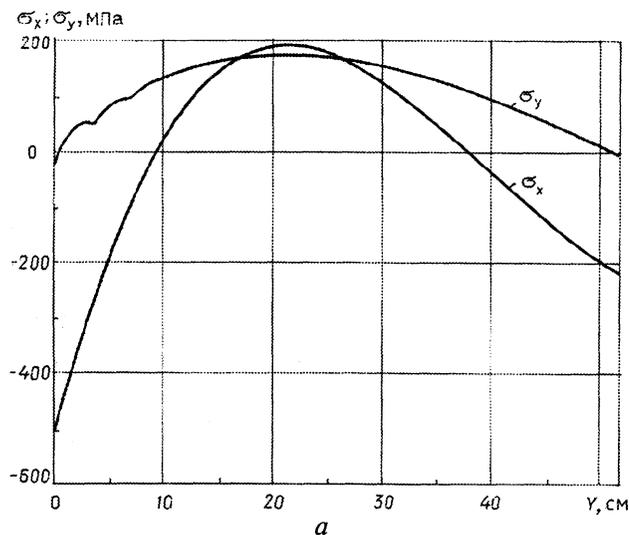


Рис. 3. Распределение компонент  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  тензора напряжений вдоль оси  $Y$  при нагреве по режиму, указанному на рис. 1, для момента времени  $t=5800$  с (а) и  $t=6200$  с (б)

нагрева без кантования. Вместе с тем процедура кантования слитка приводит к скачкообразному и весьма значительному изменению сжимающих напряжений в поверхностных слоях слитков, как показано на рис. 1, б (точки сечения 1 и 3).

Изменение картины распределения напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  по сечению слитка в моменты кантования показано на рис. 2, 3 для моментов времени, ограничивающих каскадные скачки:  $t = 3800$  и  $4200$  с (каскад №1) и  $5800$  и  $6200$  с (каскад №2).

Задание несколько увеличенного коэффициента теплообмена излучением нижних участков поверхности слитка  $\sigma_{II}=1 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) привело к еще более очевидному выравниванию температур по сечению слитка, причем к моменту окончания нагрева ( $t_k=20\ 000$  с) неравномерность температур по сечению составляет всего лишь 42 град.

Если исходить из предположения о том, что реальные значения коэффициентов  $\sigma_{II}$  (при размещении слитков на расстоянии  $1,25-1,50D$  друг от

друга) изменяются в пределах  $(0,5-1,0) \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), то полученные результаты расчетов дают основание сделать вывод о том, что процедура кантования слитка по описанному выше трехкаскадному режиму позволяет сократить полную продолжительность нагрева слитков с 30 000 до 20 000 с, т.е. на 33%. Отметим, что скачкообразное изменение напряжений в поверхностных слоях слитков при учете кантования сохраняется и при завышенном в 2 раза значении коэффициента  $\sigma_{II}$ .

На рис. 4, 5 приведены некоторые результаты расчетов нагрева слитков при учете пятикаскадного режима кантования при задании  $\sigma_{II} = 0,5 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Сопоставление результатов расчетного анализа, выполненного при задании трех- и пятикаскадного кантования, позволяет сделать следующие выводы:

- расширение пространства печи, где используется процесс кантования слитков, приводит к дополнительному выравниванию температур по сечению слитка и снижению перепада

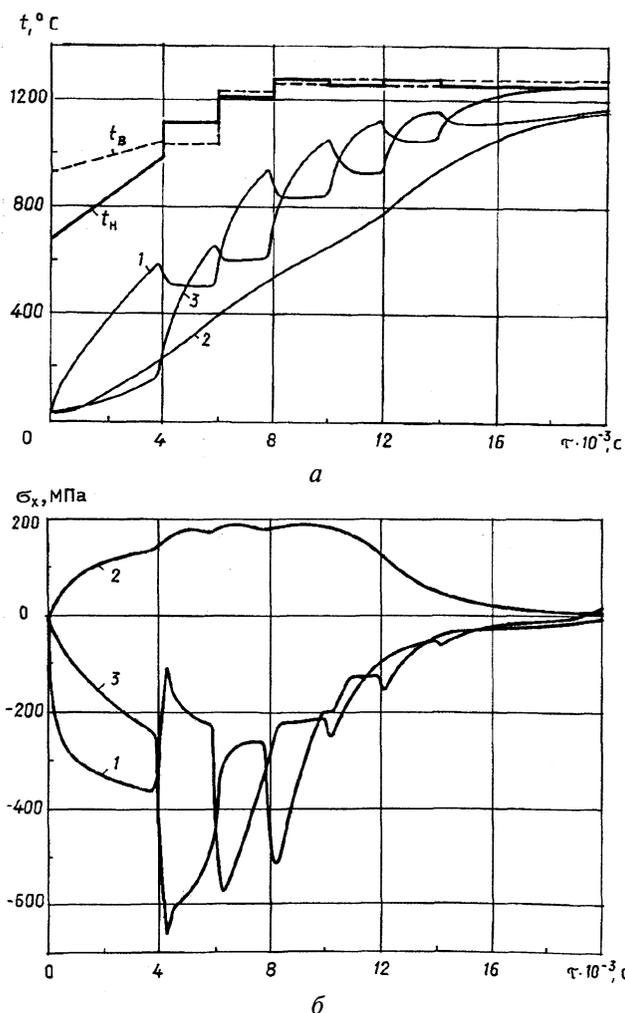


Рис. 4. Изменение во времени температур (а) и компоненты  $\sigma_x$  тензора напряжений (б) в характерных точках сечения слитка (1, 2, 3) при пятикаскадном режиме кантования при задании  $\sigma_{II}=3 \cdot 10^{-8}$ ,  $\sigma_{II}=0,5 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>),  $t_k=20\ 000$  с,  $\Delta t_k=2000$  с

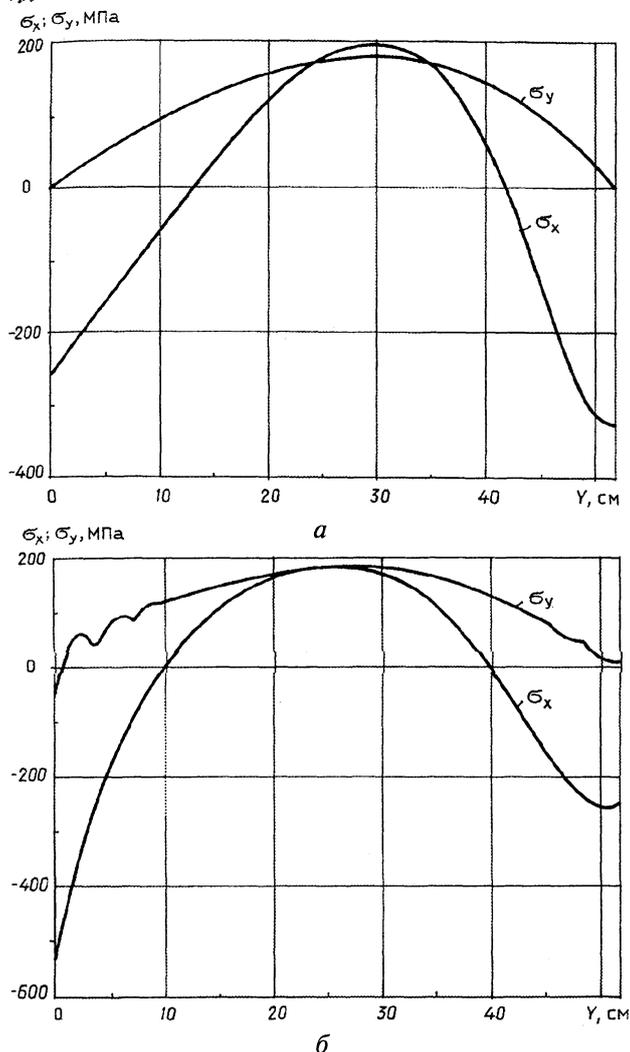


Рис. 5. Распределение компонент тензора напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  по сечению слитка при его нагреве по режиму, указанному на рис. 4, для момента времени  $t=7800$  с (а) и  $t=8200$  с (б)

температур в сечении в момент окончания нагрева;

- уровень максимальных растягивающих напряжений в осевой зоне слитка при использовании пятикаскадной схемы кантования снижается по сравнению со случаем нагрева без кантования на 17–20% (до значений 165–175 МПа), что может оказаться весьма существенным фактором при нагреве слитков из марок стали, склонных к трещинообразованию.

Следует отметить, что анализ теплового состояния стального слитка диаметром 520 мм, нагреваемого с учетом процедуры кантования, рассматривается здесь как продолжение исследований, начатых в работе [2]. В связи с этим имеет смысл сопоставить полученные нами результаты расчетных исследований с данными [2]. Отметим прежде всего, что в [2] принято кусочно-линейное изменение во времени температуры греющей среды, причем температура уходящих из печи газов, играющая роль начальной температуры для первого периода нагрева слитка, принята равной

1200 К (930 °С). Полная длительность нагрева слитка в печи принята в [2] равной 25 200 с (7 ч), причем, начиная с момента времени  $t = 10\,000$  с (~2,8 ч), в расчетах используется задание неизменной температуры греющей среды, равное 1643 К (1370 °С). В результате к моменту окончания процесса нагрева (7 ч) уровень температур на верхнем участке поверхности слитка, обращенном к своду печи, достигает значений 1580 К (~1300 °С) и представляется нам чрезмерно завышенным для большинства легированных сталей. Далее отметим, что в [2] выполнен учет кантования слитка, состоящего из пяти каскадов, каждый длительностью 1800 с, причем начало процедуры кантования соответствует входу слитка в сварочную зону печи ( $t = 10\,000$  с). Отметим также, что полученные в [2] графики изменения температуры в характерных точках слитка (1, 3) соответствуют расположению слитков вплотную друг к другу (параметр  $n$  принят равным 2), в связи с чем воспринимаемые нижней поверхностью слитков тепловые потоки приняты заниженными. Нам представляется, что в условиях нагрева слитков, используемых в расчетах работы [2], тепловые потоки, воспринимаемые верхней поверхностью слитков, чрезмерно завышены, в то время как тепловые потоки для нижних участков поверхности слитков чрезмерно занижены, что приводит к явно завышенным значениям максимальной разности температур по сечению слитков.

Вместе с тем следует признать удачным рекомендуемое авторами работы [2] значение длительности временных интервалов для каждого каскада кантования (30 мин). Как показал наш анализ, уменьшение интервала  $\Delta t_k$  с 33,3 до 16,6 мин не приводит к достаточно эффективному выравниванию температуры по сечению стального слитка диаметром 520 мм. По-видимому, для каждого размера слитка существует некоторое оптимальное значение периода кантования ( $\Delta t_k$ ), при котором обеспечивается необходимый уровень изменения перепада температур по сечению слитка.

Решение сопряженной задачи термоупругости и теплопроводности при изучении процесса кантования слитков позволило выявить принципиально новую закономерность теплового режима нагреваемых слитков. Согласно нашим расчетам, скачкообразное изменение температуры на участках поверхности слитка, обращенных к своду и поду печи, в начале каждого каскада сопровождается изменением знака термических напряжений: «растяжение – сжатие – растяжение – сжатие».

В соответствии с современными представлениями механики твердых тел подобное знакопеременное изменение напряжений в металлических изделиях ускоряет процесс разрушения изделий

по сравнению со случаем монотонного (без скачкообразных изменений во времени) действия растягивающих напряжений. Обнаружение этой закономерности ставит под сомнение целесообразность использования кантования слитков с целью снижения уровня максимальных растягивающих напряжений в осевой зоне слитка. С другой стороны, применение кантования слитков диаметром 520 мм (с периодом 2000 с для каждого каскада) обеспечивает возможность сокращения полной длительности нагрева на 25–30%, что можно признать главным положительным результатом выполненного расчетного анализа.

### Литература

1. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А., Трусова И.А., Андрианов Д.Н. Исследование процессов кантования цилиндрических заготовок в кольцевых печах. Сообщение 1. Физико-математическое моделирование // *Литье и металлургия*. 2005. №3. С. 93–97.
2. 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.
3. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Пекарский М.Я. Кольцевые печи (теория и расчеты). Мн.: Выш. шк., 1993.
4. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Козлов С.М. 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.
5. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Козлов С.М. Тепловые процессы при несимметричном нагреве слитков и заготовок перед прокаткой // *ИФЖ*. 2000. Т.73. № 6. С. 1324–1328.
6. 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.
7. Теплотехнический анализ несимметричного нагрева и кантования цилиндрических заготовок в пламенных кольцевых печах / О.В. Дубина, В.И. Тимошпольский, С.М. Козлов, И.А. Трусова // *Сб. науч. тр.: Металлургическая теплотехника*. Днепропетровск, 2001. Т.4. С. 162–167.