

6. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. М.: Машгиз, 1960. 416 с.
7. Давиденков В.А. Неоднородность стального слитка и его кристаллизация // Изв. АН СССР, Отд-ние техн. наук, 1947. С. 1683 – 1697.
8. Поволоцкий Д.Я., Роцин В.Е., Грибанов В.П. Сульфид марганца и сколы в хромоникельмолибденовой стали, полученной переплавом в водоохлаждаемый кристаллизатор // Изв. вузов. Черная металлургия. 1983. № 6. С. 64 – 67.
9. Lankford W.T. Some considerations of Strenght and Ductility in the Continious Castinf Process. Metallurgical Transations, 1972. V. 3, June. P. 1331 – 1357.
10. Влияние структурных превращений в остывающем аустените на характер термических напряжений в непрерывнолитой заготовке / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, Г.А. Анисович и др. // Литье и металлургия. 2002. № 4. С. 135 – 142.
11. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 230 с.
12. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А. Пластичность и разрушение. М.: Металлургия, 1977. 252 с.
13. Кривошеев А.Е. Литые валки. М.: Металлургиздат, 1957. 360 с.
14. Яух Р. Качество непрерывнолитых заготовок / Черные металлы, 1978. № 4. С. 20 – 30.
15. Флендер Р., Вюнненберг К. Образование внутренних трещин в непрерывнолитых заготовках // Черные металлы: Пер. с нем. 1982. № 23. С. 24 – 32.
16. Юнг Г.П., Кремер К.И., Шнитцер Х.И. Металлургические и технологические основы непрерывной разливки сортовых заготовок из специальных сталей // Черные металлы. 1984. № 4. С. 27 – 35.

УДК 621.78:536.212

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),
Ю.А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (НПП «Платан»,
 г. Екатеринбург, Россия),
Д.Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
В.А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук, **В.И. ЩЕРБАКОВ**, **И.В. КОТОВ** (РУП БМЗ)

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК СЕЧЕНИЕМ 250×300 мм ПРИ НАГРЕВЕ В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Газопламенная печь проходного типа стана 850 РУП БМЗ предназначена для нагрева под прокатку непрерывнолитых заготовок сечением 250×300 и 300×400 мм, длиной от 2,5 до 5,5 м из легированных марок стали (кордовых, инструментальных и др.). В нижних зонах печи установлено 18 боковых длиннопламенных горелок, в верхней зоне – 27 сводовых плоскопламенных горелок. Общая длина рабочего пространства печи, разделенного по расположению горелок на 7 зон (рис. 1), составляет 23 м [1, 2].

При апробации режимов нагрева непрерывнолитых заготовок из стали ШХ15СГ были зафиксированы случаи разрушения заготовок при их хо-

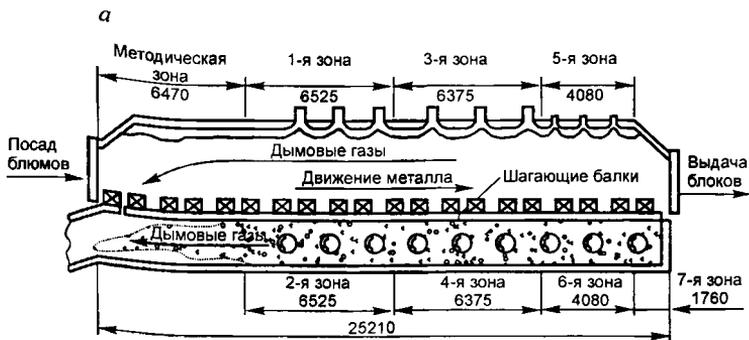


Рис. 1. Схема продольного разреза печи стана 850 БМЗ с шагающими балками (*а*) и рекомендуемое распределение температуры греющих газов вдоль печи (*б*)

лодном посаде в печь, что вызвало необходимость исследования термических напряжений, возникающих в заготовках при нагреве в печи.

В научно-технической литературе, посвященной анализу термических напряжений в стальных изделиях при их нагреве [3–5 и др.], как правило, приводятся решения задач термоупругости для тел простой формы (плиты, цилиндра и шара) в предположении неизменности теплофизических и упругих характеристик материала нагреваемых изделий. Отмеченные упрощения в постановке задач термоупругости обусловлены чрезвычайной сложностью аналитического решения сопряженных задач нестационарного теплообмена и теории температурных напряжений. В последние десятилетия использование в инженерных расчетах численного метода конечных элементов [6–8] в сочетании с использованием компьютеров открыло возможность существенного обобщения постановки задач при анализе термических напряжений в изделиях сложной формы.

Ниже приводятся результаты численного решения задачи сопряженного теплообмена и термоупругости для изделий в форме призматической заготовки (размерами 250×300 мм) с учетом нелинейностей в постановке задачи (лучистый теплообмен на поверхности заготовки, а также зависи-

мость теплофизических свойств материала (стали ШХ15СГ) и модуля упругости стали от температуры).

Математическая формулировка задачи теплопроводности для нагреваемых изделий включает уравнение нестационарной теплопроводности с учетом зависимости коэффициентов массовой плотности, удельной теплоемкости c_m и теплопроводности металла λ от температуры:

$$\rho(T)c_m(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right]. \quad (1)$$

В декартовой системе координат расчетное сечение расположено таким образом, что его широкая грань (300 мм) соответствует оси x , а узкая грань (250 мм) — оси y , как показано на рис. 2.

Граничные условия задачи теплопроводности для всех четырех граней (обозначенных $I - IV$) составлены с учетом теплообмена излучением и конвекцией:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\text{пов}} = \alpha_k(T_s - T_{\text{пов}}) + \sigma_b(T_s^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2)$$

причем коэффициент конвективной теплоотдачи α_k принят для всех граней равным $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а для расчета коэффициента радиационного теплообмена σ_b приняты следующие значения: для граней I, II и IV $\sigma_b = 1,25 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, для грани III $\sigma_b = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Таким образом, известный эффект экранирования боковых (и нижней) поверхностей заготовки косвенно учитывается путем задания значений коэффициента теплообмена излучением для граней I, II и IV , уменьшенных по сравнению с верхней гранью III .

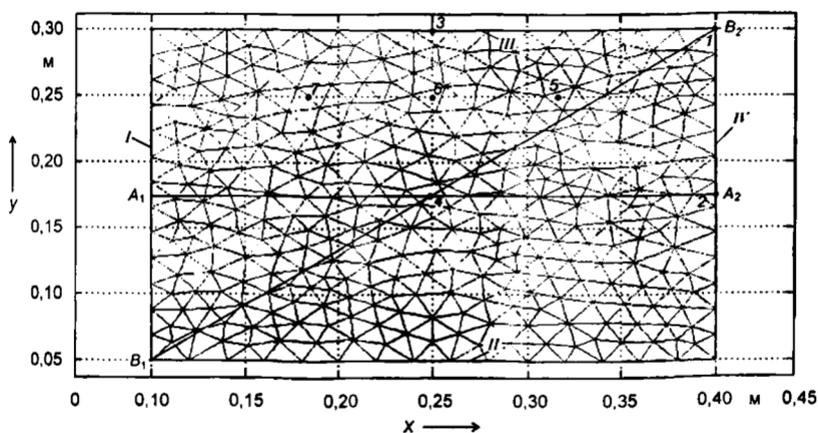


Рис. 2. Разметка представленных линий и точек в поперечном сечении заготовки размерами 250×300 мм ($A_1 - A_2$ — средняя линия, $B_1 - B_2$ — главная диагональ сечения)

Уравнения (1) и (2) дополняются заданием начального условия $T_{\text{нач}} = T_0 = 300 \text{ K} = \text{const}$.

В расчетах учитывали изменение коэффициентов ρ , c_m и λ в зависимости от температуры, представленное графиками и таблицами в книге [9, с. 276–278].

Постановка задачи термоупругости для нагреваемых заготовок прямоугольного поперечного сечения основана на использовании известной гипотезы «плоской деформации» ($\epsilon_z = \text{const}$), когда из всех компонент тензора напряжений остаются три главные (σ_x , σ_y и τ_{xy}), связанные с компонентами тензора деформаций соотношениями:

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

где D – тензор упругих констант материала:

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

В данном случае уравнения равновесия принимают следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = k_x; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = k_y; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = k_z,$$

где k_x , k_y , k_z – проекции вектора объемных сил.

При решении задачи используется предположение об отсутствии внешних нагрузок на заготовку, а на границах расчетного сечения приняты условия обращения в нуль соответствующих компонент тензора напряжений: $\sigma_x = 0$ для граней *I* и *IV*, $\sigma_y = 0$ для граней *II* и *III*. В ходе расчетов учитывается изменение модуля упругости стали в зависимости от температуры в соответствии с эмпирическими соотношениями:

$$E(T) = E_{20} - A_E(T - 20)^2 \text{ при } 20 \leq T \leq 750 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$E(T) = E_{20} - A_E(T - 20)^2 \text{ при } 20 \leq T \leq 750 \text{ }^\circ\text{C};$$

при этом $E_{20} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $E_{750} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Численное решение сопряженной задачи теплопроводности и термоупругости осуществлено методом конечных элементов, причем в расчетах использовали распределение температуры греющей среды вдоль рабочего пространства печи согласно рекомендациям [2, рис. 2, б], а также следующие значения коэффициента линейного расширения стали и числа Пуассона: $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\nu = 0,3$.

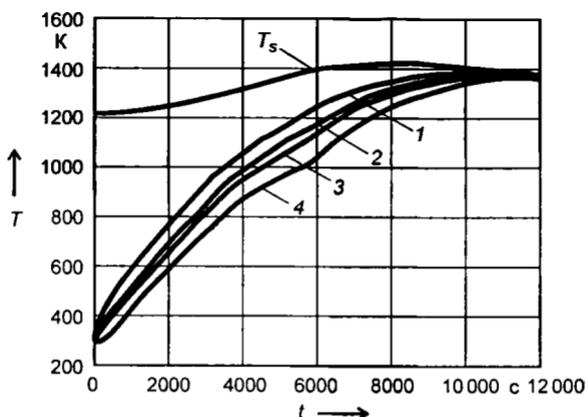


Рис. 3. Расчетные графики изменения во времени температур в точках 1–4 сечения заготовки (согласно разметке на рис. 2) и температуры греющих газов T_g

Результаты расчетов представлены в виде графиков изменения во времени и в характерных точках сечения заготовки (точки 1–7 на рис. 2), а также кривыми распределения компонент тензора напряжений вдоль линий A_1-A_2 и B_1-B_2 .

На рис. 3 показано изменение во времени температур в наиболее характерных точках сечения заготовки – в центре (кривая 1), посередине верхней (кривая 2) и боковой (кривая 3) граней, а также на ребре заготовки (кривая 4).

Отметим, что замедление подъема температуры в центре сечения заготовки (точка 1) обусловлено выделением теплоты фазовых переходов и заметным снижением коэффициента теплопроводности стали в интервале температур 650...800 °С. Полученные расчетным путем графики изменения температуры в точках 1 и 2 удовлетворительно согласуются с данными тер-

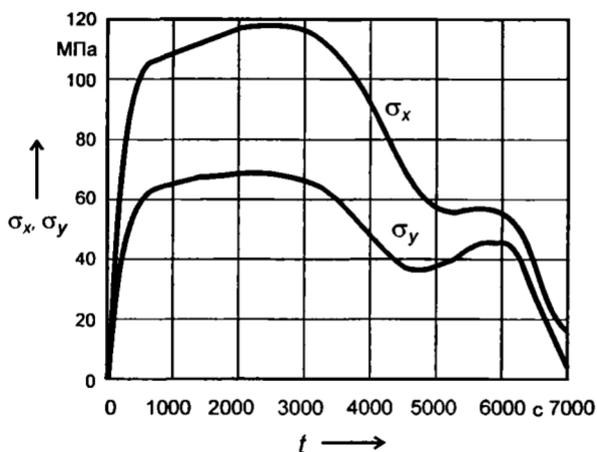


Рис. 4. Изменение во времени напряжений σ_x и σ_y в центре сечения заготовки (точка 1 на рис. 2)

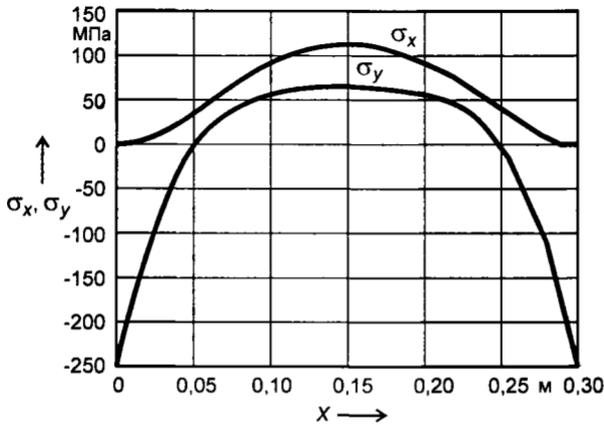


Рис. 5. Распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль линии A_1-A_2 в момент времени $t = 3000$ с

мометрирования заготовки из стали ШХ15СГ сечением 250×300 мм, выполненного в промышленных условиях.

На рис. 4 показано изменение во времени главных компонент тензора напряжений σ_x и σ_y в центре сечения заготовки. Видно, что указанные напряжения быстро нарастают на начальной стадии нагрева и достигают экстремума в интервале значений $t = 2700 \dots 3000$ с. Последующий спад растягивающих напряжений σ_x , σ_y несколько замедляется при $t > 4500$ с, а при $t = 6000$ с фиксируется новый, «малый», экстремум, обусловленный отмеченным выше замедлением прогрева центральных участков заготовки в интервале температур $650 \dots 800$ °С.

Графики на рис. 5 характеризуют изменение компонент тензора напряжений σ_x , σ_y вдоль среднего сечения заготовки, показанного линией A_1-A_2

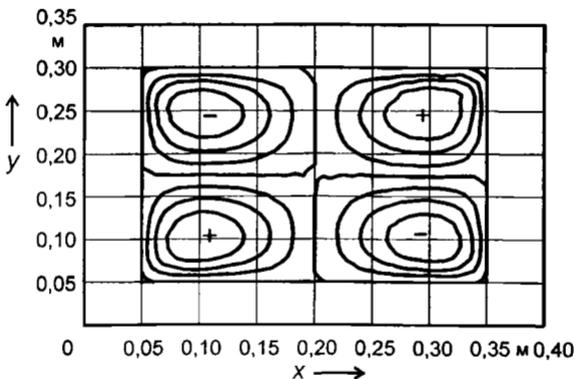


Рис. 6. «Изотермы» касательных напряжений τ_{xy} в сечении заготовки в момент времени $t = 3000$ с: $\tau_{xy} = +47,7$ МПа (кривая 1), $+31,6$ (кривая 2), $+15,6$ (кривая 3), $-0,50$ (кривая 4), $-16,6$ (кривая 5), $-32,6$ (кривая 6), $-48,7$ (кривая 7)

на рис. 2. Обращает на себя внимание смена знака напряжений σ_y при значениях x , равных 0,05 и 0,25 м, и достижение достаточно высоких значений отрицательных (сжимающих) напряжений σ_y посередине граней I и IV.

На рис. 6 представлено распределение изолиний (назовем их изотермами) касательной компоненты тензора напряжений τ_{xy} .

В отличие от других компонент (σ_x, σ_y) распределение касательных напряжений образует в сечении заготовки зоны положительных (растягивающих) напряжений, которые чередуются в шахматном порядке, оставляя участки нулевых касательных напряжений в плоскостях симметрии поперечного сечения заготовки.

Графики на рис. 7 характеризуют изменение во времени экстремальных значений касательных напряжений в зонах растяжения (кривая 1) и сжатия (кривая 3). Отметим, что кривые 1, 2, 3 на рис. 7 соответствуют выделенным в сечении заготовки характерным точкам 5, 6 и 7 (см. рис. 2). Достижимые максимумы растягивающих касательных напряжений τ_{xy} (-63 МПа) зафиксированы при построении графика изменения показателя τ_{xy} вдоль главной диагонали поперечного сечения $B_1 - B_2$.

Представленные выше результаты вычислений дают основания для оценки наиболее опасных с точки зрения возможности нарушения сплошности металла участков в поперечном сечении нагреваемой заготовки. К таким участкам в первую очередь относится центральная зона поперечного сечения, где сумма компонент σ_x и σ_y достигает к моменту времени $t = 3000$ с значений 130...135 МПа.

Как показывает анализ решений задачи термоупругости для нагреваемых изделий в форме цилиндра и призмы квадратного поперечного сечения, значение продольных напряжений σ_z в условиях соблюдения плоской деформации близко к указанной сумме компонент тензора напряжений. Безусловно, полученное путем расчета значение максимальных растягивающих напряжений (135 МПа) намного меньше предела прочности стали

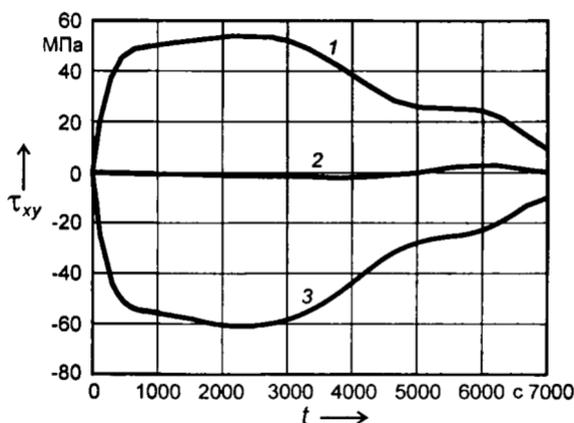


Рис. 7. Изменение во времени касательных напряжений τ_{xy} в точках 5–7 (согласно разметке на рис. 2)

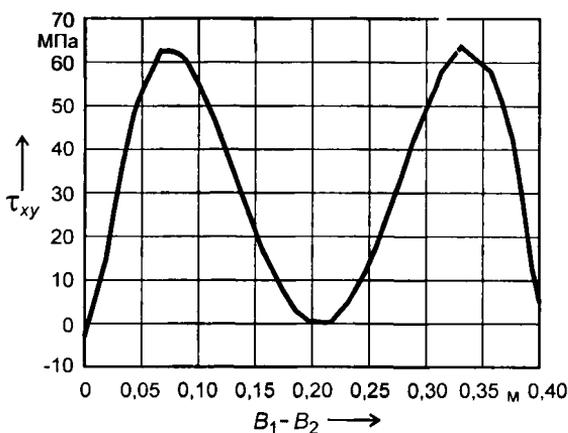


Рис. 8. Изменение во времени касательных напряжений τ_{xy} вдоль главной диагонали $B_1 - B_2$ сечения заготовки в момент времени $t = 3000$ с

ШХ15СГ при соответствующей температуре в центре заготовки (450...500 °С в момент $t = 3000$ с). Однако в совокупности с растягивающими остаточными напряжениями, которые в неотожженной непрерывнолитой заготовке из стали ШХ15СГ могут, по нашим оценкам, достигать 600...750 МПа, сумма остаточных и временных напряжений (обусловленных неравномерностью температур при нагреве заготовки) может превысить предел прочности металла и привести к разрушению, что подтверждается экспериментами, выполненными в промышленных условиях.

Дополнительные опасения вызывает наличие зон растягивающих касательных напряжений (рис. 6 – 8). Выявление данного фактора, имеющего несомненную практическую ценность, подтверждает полезность обобщения постановки задач термоупругости за счет использования современных компьютерных технологий в сочетании с численным методом конечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная методология разработки экономичных режимов нагрева стали в печах / В.И. Тимошпольский, В.А. Тищенко, С.М. Козлов и др. // *Сталь*. 2002. № 10. С. 102 – 107.
2. Разработка технологии нагрева инструментальной стали / В.И. Тимошпольский, А.Б. Стеблов, В.В. Филиппов и др. // *Литье и металлургия*. 2001. № 2. С. 123 – 126.
3. *Тайц Н.Ю.* Технология нагрева стали. М.: Металлургиздат, 1962. 567 с.
4. *Паркус Г.* Неуставившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 251 с.
5. *Боли Б., Уэйнер Дж.* Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 517 с.
6. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
7. *Сегерлинд Л.Дж.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
8. *Секулович М.* Метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.
9. *Стальной слиток: В 3 т. Т. 3: Нагрев* / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова, В.В. Филиппов; Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Бел. наука, 2001. 879 с.