

Теоретическое определение температурных напряжений в цилиндрических деталях технологического оборудования

МИХАЙЛУСЬ И.А. *, БУТАКОВ Б.И. **, МИХАЙЛУСЬ А.С. *, МИХАЙЛУСЬ П.А. *

*Днепропетровский государственный технический университет

**Государственный аграрный университет, г. Николаев

В работе приведено приближенное аналитическое решение для определения температурных напряжений в прокатных валках и роликах рабочих рольгангов обжимных прокатных станов при установившемся режиме работы. Установлено влияние отдельных параметров на уровень напряжений. Даны рекомендации, которые могут быть учтены при расчете прокатных валков и роликов рольгангов прокатных станов.

В роботі наведено наближене аналітичне рішення для визначення температурних напружень в прокатних валках та роликах робочих рольгангів обжимних прокатних станів при сталому режимі роботи. Встановлено вплив окремих параметрів на рівень напружень. Дані рекомендації, які можуть бути враховані при розрахунках прокатних валків та роликів рольгангів прокатних станів.

In the approached analytical solution for definition of temperature stresses in mill rolls and rollers of operating roller conveyers of blooming rolling machine tools at being fixed duty is resulted. It is established influence of separate parameters on stress level. Are given recommendations, that may be considered at calculation of mill rolls and rollers of roller conveyers of rolling mills.

Введение. Цилиндр (полюй или сплошной) – один из самых распространенных конструктивных элементов механического оборудования многих отраслей промышленности и прежде всего машиностроения и металлургии. Условия службы агрегатов и машин в этих отраслях усугубляются тем, что помимо силовой нагрузки здесь активно действуют высокие температуры, неизбежные в технологических процессах нагрева металла и последующей прокатки, штамповки,ковки. Это ролики нагревательных печей, МНЛЗ, рольгангов, хоботы завалочных машин, глиссажные трубы внутри печной оснастки, валки прокатных станов и др.

Действие температуры обуславливает появление температурных напряжений, без учета которых обеспечение прочности, надежности и долговечности проектируемого соответствующего теплотехнического оборудования невозможно.

Исследованием полей напряжений и деформаций, создаваемых действием температуры занимается наука известная под названием термомеханика.

Следует заметить, что процесс деформирования сопровождается выделением тепла. Это тепло довольно ощутимо при больших скоростных пластических деформациях металла (прокатка, штамповка,ковка и др.). Однако при упругих деформациях тепловыделения настолько незначительны, что ими обычно пренебрегают. Это упрощение позволяет температурное состояние тела нагреваемого внешними источниками тепла, определять решением соответствующей краевой задачи теплопроводности (КЗТ). А затем, приняв полученную функцию распределения температуры как «нагрузочную функцию», исследовать термонапряженное состояние (ТНС) тела по решению соответствующей задачи термоупругости. Это уже так званая несвязанная термомеханика (НТМ).

Точные решения задач НТМ (теорий теплопроводности и термоупругости) обычно приводят к сложным выражениям трудно реализуемым при инженерных расчетах. Это, по-видимому, является основной причи-

ной того, что в широко используемой справочной литературе прочностные расчеты металлургического оборудования ведутся только под механическую нагрузку и нет никаких практических рекомендаций по учету температурных напряжений, которые нередко оказываются выше механических.

Постановка задачи. Целью данной работы является: исследование напряженного состояния прокатных валков, роликов рабочих рольгангов обжимных прокатных станов в зависимости от геометрических, теплофизических, механических характеристик и режимов силового и температурного нагружения; разработка инженерных методик расчета конкретных цилиндрических деталей технологического (металлургического) оборудования; выдача рекомендаций, направленных на повышение их надежности, прочности и термостойкости.

Решение задачи. Задача определения температурного состояния локально нагреваемого вращающегося цилиндра возникает при расчете валков прокатных станов, роликов рабочих печных рольгангов и МНЛЗ. При определенных допущениях решение таких КЗТ в замкнутой форме даны, например, в работах [1, 2]. Однако эти решения представлены неограниченными рядами, содержащими специальные функции, что делает их чрезвычайно неудобными для инженерного применения. Поэтому инженерная теплофизика широко использует различные приближенные (аналитические, аналоговые, численные) методы. Это тем более оправдано, что, во-первых, в современной технике все актуальнее становится нелинейное математическое моделирование, где точные решения отсутствуют, во-вторых, приближенность исходных данных реальных объектов делает любой технологический расчет (даже по точности решения) приближенным.

Металлургическая теплотехника традиционно тяготеет к приближенным аналитическим методам.

В работе [1] рассматривается установившийся процесс, когда температура в любой торчке цилиндра изменяется во времени по периодическому закону. Если

отнести вращающийся цилиндр к неподвижной системе координат XOY Рис. 1, то по отношению к ней ТНС цилиндра является квазистационарным. При неизменной температуре вдоль продольной оси определение температурного поля такого цилиндра сводится [1] к решению уравнения

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = -\eta \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \quad (1)$$

$$\theta(\rho, \tau) = \frac{T(\rho, \varphi) - T_0}{T_{\max} - T_0}; \quad \theta_1(1, \tau) = \frac{T_1 - T_0}{T_{\max} - T_0} = \theta_1; \quad (2)$$

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad \varphi = \omega \tau; \quad \eta = \omega R^2 / a.$$

$T_0 = const$ - начальная температура цилиндра, К;

T_{\max} - максимальная температура, К;

T_1 - минимальная температура поверхности, К;

r - радиальная координата, м;

φ - угловая координата, рад;

R - радиус сечения цилиндра, м;

ω - циклическая частота вращения, рад/час;

τ - время, ч;

a - коэффициент температуропроводности материала, м²/ч.

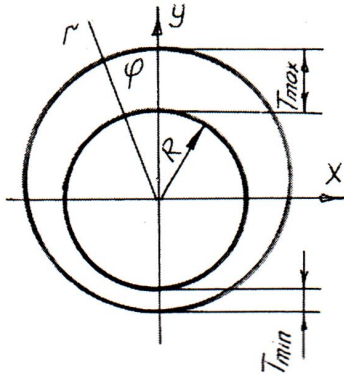


Рис. 1. Расчетная схема

Как уже отмечалось, точные решения уравнения (1) при определенных граничных условиях даны в работах [1, 2]. Но они оказались весьма сложными. В работе [3] получено приближенное решение при граничных условиях 1-го рода

$$\theta_{II}(\varphi) = \frac{1 + \theta_1}{2} + \frac{1 - \theta_1}{2} e^{i\varphi} \quad (3)$$

Но и это решение, несмотря на структурную простоту, довольно громоздко.

Более рационально к определению температурного поля прокатного вала и ролика рольганга подойти полуэмпирически, используя экспериментальные данные.

Из литературных источников (например [4]) известно, что высокие температуры (до 350÷500°C) достигаются лишь в узкой зоне контакта ролика с раскатом и то в очень тонком (0,2...0,5 мм) поверхностном слое; на глубине $\delta = 1,5 \div 2$ мм температура падает до 200-250°C, при $\delta = 4 \div 5$ мм она уже снижается до 60÷80°C. А уже глубже ролик сохраняет неизменную температуру порядка 40÷50°C.

Учитывая это, а также уточнения на основе численного решения [4], примем априори температурную функцию в виде

$$\theta(\rho, \tau) = \left(\frac{1 + \theta_1}{2} + \frac{1 - \theta_1}{2} \cos \varphi \right) \rho^n, \quad (4)$$

где показатель степени n , согласно [5], довольно большое число.

Заметим, что функция (4) на поверхности ($\rho = 1$) соответствует действительной части граничного условия (3).

В работе [5] задача термоупругости решалась конечно-разностными методами. Проведенные расчеты валков [5] при неосесимметричном нагреве показали, что нормальные напряжения σ_r , σ_φ , $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\varphi$ (для свободных торцов) с достаточной точностью можно определять по известным решениям несвязанной теории термоупругости

$$\bar{\sigma}_r(\rho, \varphi) = \int_0^1 \theta(\rho, \varphi) \rho d\rho - \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \theta(\rho, \varphi) \rho d\rho; \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_r(\rho, \varphi) = \int_0^1 \theta(\rho, \varphi) \rho d\rho + \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \theta(\rho, \varphi) \rho d\rho - \theta(\rho, \varphi); \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_z(\rho, \varphi) = 2 \int_0^1 \theta(\rho, \varphi) \rho d\rho - \theta(\rho, \varphi). \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{\sigma} = \sigma / K_\sigma; \quad K_\sigma = \alpha_T E (T_{\max} - T_0) / (1 - \nu). \quad (8)$$

Появляющееся же из-за неосесимметричности температурного поля касательное напряжение определяется соответствующим дифференциальным уравнением равновесия

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \bar{\tau}_\varphi \right) = - \frac{\partial \bar{\sigma}_\varphi}{\partial \varphi} \quad (9)$$

После подстановки функции температурного напряжения (4) в выражения (5)...(7) получаем

$$\bar{\sigma}_\sigma(\rho, \varphi) = \frac{\tilde{\theta}(\varphi)}{n+2} (1 - \rho^n); \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_\sigma(\rho, \varphi) = \frac{\tilde{\theta}(\varphi)}{n+2} [1 - (n+1)\rho^n]; \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_\sigma(\rho, \varphi) = \frac{\tilde{\theta}(\varphi)}{n+2} [2 - (n+2)\rho^n], \quad (12)$$

где

$$\tilde{\theta}(\varphi) = \theta_{II}(\varphi) = \frac{(1 + \theta_1) + (1 - \theta_1) \cos \varphi}{2}. \quad (13)$$

Подставляя (11), (13) в (9) и интегрируя имеем

$$\bar{\tau}_{r\varphi} = \frac{1 - \theta_1}{4} \sin \varphi. \quad (14)$$

Проведем тестовый пример, при следующих данных: $\theta_1 = 0,5$; $n = 8$. Результаты расчета сведены в табл. 1, а также иллюстрируются графиками (рис. 2).

В зоне контакта с раскатом механические напряжения

$$\sigma_M = - \frac{M}{W_z} \quad (15)$$

сжимающие.

В этой же зоне наибольшие температурные напряжения также сжимающие $\sigma_z(1, 0)$.

Таблица 1

φ	$\rho = 0$				$\rho = 1$				ρ^*0
	$0,2\pi$	$\pi/2$	π	$\frac{2}{3}\pi$	$0,2\pi$	$\pi/2$	π	$\frac{2}{3}\pi$	
$\bar{\sigma}_r$	0,10	0,075	0,05	0,075	0	0	0	0	-1
$\bar{\sigma}_\varphi$	0,10	0,0758	0,05	0,075	-0,8	-0,6	-0,4	-0,6	0,760
$\bar{\sigma}_z$	0,20	0,15	0,10	0,15	-0,8	-0,6	-0,4	-0,6	0,818
$\bar{\tau}_{r\varphi}$	0	0,125	0	-0,125	0	0,125	0	-0,125	-

*) ρ_0 - координата, где соответствующее напряжение обращается в нуль.

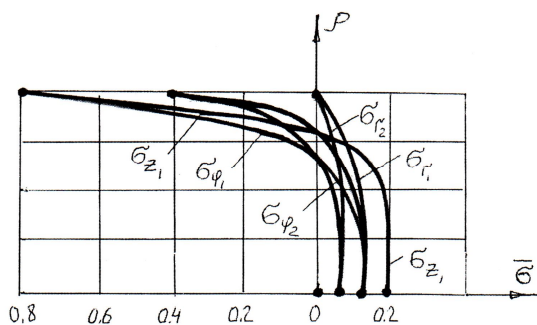


Рис. 2. Графики изменения температурных напряжений

На противоположной стороне вала механические напряжения от изгиба будут растягивающие той же величины (15).

Температурные же напряжения останутся сжимающие $\sigma_z(1, \pi)$, но меньшие $\sigma_z(1, 0)$.

Приведем результаты числового расчета напряжений в ролике рабочего рольганга блюминга 1150. Ролик изготовлен из стал 45 диаметром $D_p = 500$ мм. Принято: $T_{\max} = 300^\circ\text{C}$; $T_{\min} = 150^\circ\text{C}$; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $a = 12 \cdot 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$; $\nu = 0,3$.

При этих исходных данных получено $\sigma_{z_{\max}} = -412$ МПа, $\sigma_{z_{\min}} = -160$ МПа; среднее напряжение цикла $\sigma_m = -281$ МПа; амплитудное напряжение $\sigma_a = -176$ МПа; напряжения от механических воздействий $\sigma_F = 132,48$ МПа.

Из числовых расчетов следует, что температурные напряжения на поверхности ролика значительно превышают механические и являются первопричиной появления термических трещин (сетки разгара).

С целью повышения долговечности роликов предлагается применять поверхностное механическое упрочнение с помощью вибрирующего ролика [6].

Выводы

Получено приближенное аналитическое решение для определения температурных напряжений в прокатных валах и роликах рабочих рольгангов обжимных прокатных станов при установленном режиме работы. Установлено влияние отдельных параметров на уровень напряжений. Даны рекомендации по повышению долговечности роликов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 252 с.
2. Третьяков А.В. Совершенствование теплового процесса листовой прокатки. М.: Металлургия, 1973. 301 с.
3. Губа В.М., Постольник Ю.С., Литвиненко В.Н. К расчету температурных напряжений в роликах МНЛЗ //Изд. вуз. Черная металлургия, 1988. № 4с. 127-131.
4. Тылкин М.А., Яловой Н.И., Поолухин П.Н. Температура и напряжения в деталях металлургического оборудования. М.: Высшая школа, 1970, 352 с.
5. Львовский В.М. Развитие научных основ повышения прочности элементов металлургических машин и агрегатов при температурных воздействиях: Автореферат диссертации д-ра техн. наук Днепропетровск: ДМетИ, 19990, 29 с.
6. Михайлусь А.С., Мамаев Л.М., Михайлусь И.А. и ДР. Влияние ППД на повышение эксплуатационной надежности деталей работающих в условиях повышенной температур. Материалы пятой юбилейной промышленной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. Киев, 2005, с. 255-260.

пост. 28.11.08