

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ю.С. Комратов, О.С. Лехов

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВАЛКАХ УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА

Для определения температурных напряжений в валках следует сначала найти температурное поле, возникающее в валках при прокатке. Затем по найденному полю температур определить термоупругие напряжения в валках.

В соответствие с принятой конструкцией системы охлаждения валков на них при прокатке действуют следующие температурные граничные условия – это контакт в очаге деформации, нагрев излучением от горячего металла, а также водяное и воздушное охлаждение. Водяное охлаждение и излучение действует в зоне катающих поверхностей валков, а воздушное – на боковых поверхностях валков.

Вследствие необходимости учета отвода тепла в осевом направлении валков из-за малой ширины их бочек, определение температурных полей необходимо выполнять в объемной постановке.

Температурное поле валков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. [1]

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

где c – теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности.

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры валков.

Начальное условие для функции $T(\vec{X}, t)$ имеет вид

$$T(\vec{X}, t) = T_0(\vec{X}) \quad (2)$$

Для катающих поверхностей валков принимаются граничные условия третьего рода, представляющими собой заданный тепловой обмен по закону Ньютона

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_1(T - T_e) + q \text{ на } S_1 \quad (3)$$

Для боковых поверхностей валков:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_2(T - T_e) \text{ на } S_2 \quad (4)$$

Для зон контакта валков с металлом

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a_3 (T_m - T) \text{ на } S_3 \quad (5)$$

В формулах (3)–(5) приняты следующие обозначения: S_1 – катающие поверхности валков, охлаждаемые водой; S_2 – боковые поверхности валков, охлаждаемые воздухом; S_3 – зона контакта валков с балкой (очаг деформации); T_a – температура окружающего воздуха (принимается равной 30°C); T_m – температура металла балки; q – тепловой поток от излучаемого металла; a_1, a_2, a_3 – соответственно коэффициенты теплоотдачи при охлаждении водой, воздухом и коэффициент контактной теплопередачи от излучаемого металла.

Величину теплового потока q от излучаемого металла записываем в соответствии с законов Стефана-Больцмана. [1, 2]

$$q = \epsilon_B \epsilon_B c_0 z (T_{ПВ}^4 - T_{ПБ}^4) \quad (6)$$

где ϵ_B – степень черноты материала балки; ϵ_B – степень черноты материала валка; c_0 – постоянная Стефана-Больцмана; z – коэффициент взаимоблучения, изменяющийся от 1 до 0; $T_{ПВ}$ – температура поверхности валка; $T_{ПБ}$ – температура поверхности балки.

Уравнения (2)–(6) образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для несвязанной задачи теплопроводности.

По найденному полю температур в последующем в каждый момент времени можно определить поле деформаций и температурных напряжений в соответствии со следующим алгоритмом.

Для того, чтобы учесть температурные эффекты, обычно исходят из предположения, что упругая и температурная деформация аддитивны. Тогда можно записать основное определяющее соотношение для напряжений в виде

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T) \quad (7)$$

где α_{kl} – тензор коэффициентов термического расширения; ΔT – изменение температуры, отсчитанное от естественного (ненапряженного и недеформированного) состояния

$$\Delta T = T - T_0$$

Соотношение (7) называемое соотношением Дюамеля–Неймана, лежит в основе линейной термоупругости. [3]

Для тел, механические и теплофизические свойства которых изотропны, соотношение (7) принимает вид:

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\epsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

где G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; δ_{ij} – символ Кронекера; e – объемное расширение, $e = \epsilon_z + \epsilon_y + \epsilon_x$

Последнее слагаемое в правой части формулы (8) отражает влияние на напряжения температурной деформации.

Таким образом, если температурное поле в области известно, то соотношения (7)–(8) применимы к задачам термоупругости, где все параметры являются функциями температуры.

Таким образом, для определения термоупругих напряжений в валке необходимо:

– в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечно-элементной сетки в соответствии с выше поставленной задачей расчета температур;

– затем для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости. При этом в качестве граничных условий необходимо задать на всей поверхности валка только отсутствие внешних сил. Тогда разрешающие уравнения (7)–(8) позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечно-элементного разбиения, а затем определяются и температурные деформации и напряжения.

Данная схема выполнения расчетов повторяется и реализована в одном из модулей пакета ANSYS. [4]

Принимаем, что вертикальные валки изготовлены из стали 60ХН. Горизонтальные валки являются бандажированными. Бандаж состоит из двух слоев. Материал наружного бандажа – сталь 150 ХНМ, внутреннего бандажа – сталь 100 ХНМ. Двухслойный бандаж насажен на ось, изготовленной из стали 60ХН (табл. 1).

Для решения задачи нестационарной теплопроводности (1) с краевыми условиями (2–5) и зависимостью (6) необходимо задать ряд параметров, конкретизирующих тепловой режим работы валков.

Степень черноты поверхность валка ϵ_B примем равной 0,54, исходя из данных для роликов МНЛЗ, полученных экспериментально.

Таблица 1

Принятые для расчета значения модуля упругости E , плотности ρ , теплопроводности λ , теплоемкости C , коэффициента линейного расширения α и предела текучести σ_m для стали 150ХНМ в интервале температур от 20 °С до 700 °С [5]

Параметр	Температура, °С							
	20	100	200	300	400	500	600	700
$E \times 10^{-5}$, МПа	2,09	2,05	2,00	1,93	1,85	1,78	1,66	1,40

$\rho \times 10^6$, кг/мм ³	7,83	7,81	7,78	7,75	7,71	7,67	7,63	7,52
$\lambda \times 10^3$, Вт/(мм·град)	40	45	43	40	37	35	32	28
C , Дж/(кг·град)	469	503	519	536	553	720	611	712
$\alpha \times 10^6$, 1/град	10,5	11,8	12,6	13,4	14,1	14,8	13,3	15,0
σ_t , МПа	690	690	660	640	620	460	330	105

Для расчетов принято, что величина a_1 при максимальном расходе воды 100 м³/ч для вертикальных валков диаметром 1000 мм и горизонтальных валков диаметром 1500 мм составляет 1400 Вт/(м²·°C).

Величину коэффициента теплоотдачи a_2 охлаждения боковых поверхностей воздухом рассчитаем по формуле [5]

$$\alpha_2 = \begin{cases} 120 \cdot (0,35 \cdot 10^{-3} T + 0,12) \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{град}, T \leq 400^\circ \text{C} \\ 120 \cdot (1,46 \cdot 10^{-3} T - 0,314) \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{град}, T \geq 400^\circ \text{C} \end{cases}$$

При температуре окружающего воздуха 30°C $a_2 = 14,5$ Вт/(м²·°C).

Принимаем для расчета значение коэффициента контактной теплопередачи на уровне 5000 Вт/(м²·°C) независимо от времени контакта валка с металлом и его температуры.

Величина коэффициента теплоотдачи a_2 охлаждения боковых поверхностей воздухом принята равной 14,5 Вт/(м²·°C).

На рис. 1 представлены изолинии температур в горизонтальном валке для момента прокатки балки.

Для рассчитанных полей температур были определены величины тангенциальных напряжений σ_t . Результаты приведены также для срединного слоя валков и только на поверхности. Напряжения даны для случаев, когда прокатано только три балки, а также для установившегося режима работы. Типовой характер эпюр тангенциальных напряжений по сечению валка представлен на рис. 2. Кроме того, результаты также даны на развертке валков по углу. Наглядно напряжения изображены на рис. 3.

Представленные результаты свидетельствуют, что в зоне контакта валка с металлом имеют место сжимающие напряжения. Причем они действуют практически только в зоне валка, контактирующего с металлом. В зонах, где валок не контактирует с металлом, напряжения имеют растягивающий характер. Их уровень значительно ниже, чем в зоне контакта валка с металлом.

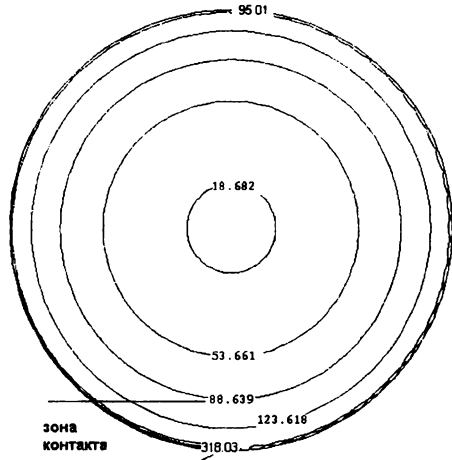


Рис. 1. Изолинии температур ($^{\circ}\text{C}$) в горизонтальном валке (срединное сечение) при установившемся режиме работы. При прокатке балок 30Ш в клети ГУК1 (проход 3). $a_1 = 1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Температура прокатки 1040°C . Изолинии приведены для момента прокатки балки

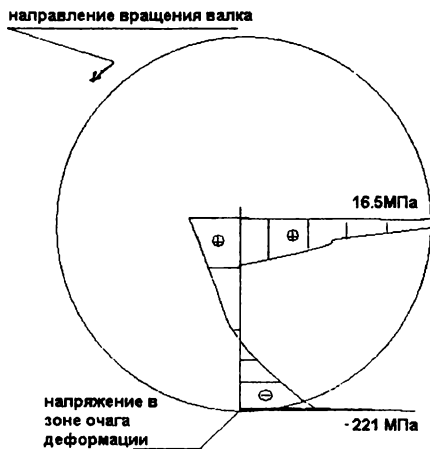


Рис. 2. Эпюры тангенциальных температурных напряжений σ_t по сечению горизонтального валка (срединное сечение) после прокатки балок 30Ш в клети ГУК1 (проход 3). $a_1 = 1400$ Вт/(м²·°С). Квазистационарный температурный режим. Температура прокатки 1040°С

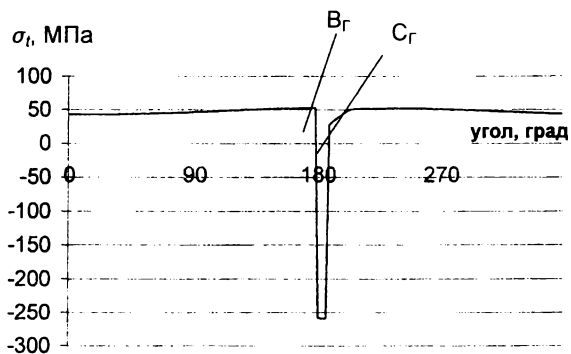


Рис. 3. Эпюры тангенциальных температурных напряжений σ_t на поверхности горизонтального валка (срединное сечение) после прокатки трех балок 30Ш в клети ГУК1 (проход 3). $a_1 = 2000$ Вт/(м²·°С). Температура прокатки 1040°С. Точки В_Г и С_Г соответствуют положению очага деформации

Если проанализировать влияние a_1 на характер напряженного состояния, то видно, что при увеличении этого коэффициента, что означает увеличение подачи воды на катающую поверхность, увеличиваются как сжимающие напряжения в очаге контакта валка с металлом, так и растягивающие напряжения вне этого очага. Данный эффект закономерен, ибо при большой подаче воды на валок увеличивается скорость его охлаждения, что приводит к увеличению градиентов температур, а следовательно и к увеличению напряжений.

При уменьшении подачи воды уменьшаются сжимающие напряжения в зоне контакта валка с металлом. При этом вне очага деформации напряжения в валке переходят из растягивающих напряжений в сжимающие, что более благоприятно.

Интегральные результаты расчета для горизонтальных валков при прокатке заготовки даны в табл. 2.

Таблица 2

Клеть	№ прохода	Максимальные тангенциальные напряжения σ_t , МПа	a_1	T_m , °С
-------	-----------	---	-------	------------

		После прокатки трех балок		При установившемся режиме работы		Вт/(м ² ·°С)	
		В очаге	Вне очага	В очаге	Вне очага		
ГУК1	3	-259	52,9	-268	47,1	2000	1040
		-221	16,5	-221	19,6	1400	
		-202	-11,8	-203	-41,6	500	
	5	-181	23,1	-184	31,4		980
ГУК2	7	-169	17,6	-167	22,4	1400	900
		-138	25,4	-138	32,2		800
		-127	29	-128	37,1		700

Представленные результаты свидетельствуют о необходимости выбора рациональной системы охлаждения валков, обеспечивающий благоприятный характер напряженного состояния валков.

Таким образом, теоретическими исследованиями установлено, что циклическое изменение температуры валков (разогрев до 300°С – охлаждение до 90°С) происходит в поверхностном слое валка на небольшой глубине 3–5 мм, что приводит к возникновению растягивающих тангенциальных напряжений, достигающих 103 МПа и существенно снижающих стойкость валка. Это подтверждается экспериментальными исследованиями стойкости горизонтальных валков универсальных клетей УБС НТМК, где установлено, что поперечные и продольные трещины (сетка разгара) образуются в поверхностном слое валка глубиной 3–6 мм.

Библиографический список

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
2. Шорин С.Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1964. 490 с.
3. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М.: Мир, 1986. 318 с.
4. ANSYS. Structural Analysis Guide Rel. 6.0 [http// www.cadferm.ru](http://www.cadferm.ru).
5. Комратов Ю.С., Лехов О.С. Совершенствование производства проката в условиях НТМК. Изд-во «Банк культурной информации», 2002. 384 с.