

Ю.М. Юрин, В.И. Малыгин

Филиал «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного морского технического университета

Юрин Юрий Михайлович родился в 1940 г., окончил в 1970 г. Горьковский политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры физики филиала «Севмашвтуз» СПбГМТУ. Имеет более 50 научных работ в области теплофизики процессов затвердевания и охлаждения стальных отливок в сухих и влажных формах. E-mail: rector@sevmashvtuz.edu.ru



К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАПЛАВКЕ ПИТАТЕЛЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Разработана методика расчета тепловых процессов и напряжений при наплавке металла на цилиндрические поверхности питателей целлюлозно-бумажного производства; даны рекомендации по повышению их эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: питатели целлюлозно-бумажного производства, температура, напряжения, наплавка металла, количество теплоты.

Особенности некоторых непрерывных технологических процессов специфических производств предъявляют повышенные требования к надежности элементов технологического оборудования. В частности, в производстве целлюлозы одним из наиболее ответственных узлов являются питатели высокого и низкого давлений, работающие в неблагоприятных условиях циклических нагрузок и абразивного изнашивания. В связи с этим восстановление изношенных поверхностей питателей является весьма актуальным. Причем габариты, масса питателей, а также сквозные поперечные сложные каналы большого сечения создают немалые трудности при их ремонте. Опыт восстановления питателей на Архангельском и Котласском ЦБК, а также на Сыктывкарском ЛПК показал, что несмотря на существенные различия в технологических процессах ремонта питателей имеют место одни и те же негативные явления (например, наличие сетки даже визуально наблюдаемых трещин после проточки наплавленных поверхностей как следствие действия внутренних растягивающих напряжений). Все перечисленное выше ставит, прежде всего, задачу разработки методики расчета температурных режимов в технологическом процессе наплавки поверхностей питателей, на основе которой можно назначать оптимальные режимы наплавки, обеспечивающие максимально возможный период их безотказной эксплуатации.

Введем следующие обозначения: $T_{ж.м}$ – начальная температура наплавленного жидкого металла; $R = S/l_{п}$ – приведенный размер поперечного

сечения площадью S и длиной периметра $l_{\text{п}}$ наплавленного за один проход металла; $R_{\text{ш}} = 2R$ – средний радиус поперечного сечения шва; $R_{\text{ц}}$ – радиус цилиндра; $c_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{ж}}$, $c_{\text{т.ж}}$ и $\rho_{\text{т.ж}}$, $c_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость и плотность соответственно жидкого, твердожидкого и затвердевшего металла; $T_{\text{н}}$ – начальная температура цилиндра; $T_{\text{Л}}$, $T_{\text{С}}$ – температуры ликвидуса и солидуса; $\Delta T_{\text{п}}$ – начальный перегрев жидкого металла над температурой ликвидуса; $T_{\text{о}}$ – среднеинтегральная температура наплавленного слоя металла в процессе охлаждения; λ – коэффициент теплопроводности металла; L – эффективная удельная теплота затвердевания; X – глубина прогретого слоя цилиндра; r – расстояние от поверхности наплавленного слоя металла до точек цилиндра с температурой T ; n – показатель распределения температуры прогретого слоя цилиндра; a – ширина наплавленного шва за один проход.

Запишем распределение температуры по толщине прогретого слоя цилиндра (рис. 1) [1]:

$$T = T_{\text{н}} + (T_{\text{о}} - T_{\text{н}})(1 - r/X)^n. \quad (1)$$

В связи с небольшой величиной перепада температур по толщине наплавленного для процесса затвердевания слоя будем им пренебрегать.

Теплоотвод от рассматриваемого элемента (длиной l) наплавленного слоя по длине окружности наружной поверхности цилиндра осуществляется в окружающую среду через наружную поверхность и внутрь цилиндра.

Количество теплоты $dQ_{\text{ц}}$, отведенное внутрь цилиндра за время dt :

$$dQ_{\text{ц}} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} S dt = \lambda \frac{(T_{\text{о}} - T_{\text{н}})}{X} n \cdot 0,75 \cdot 2\pi R_{\text{ш}} l_{\text{ср}} dt, \quad (2)$$

где $(\partial T/\partial r)_{r=0}$ – градиент температуры на поверхности раздела наплавленного слоя с цилиндром, $(\partial T/\partial r)_{r=0} = -(T_{\text{о}} - T_{\text{н}})n/X$;

S – площадь поверхности охлаждения элемента шва внутри цилиндра, $S = 0,75 \cdot 2\pi R_{\text{ш}} l_{\text{ср}}$;

$l_{\text{ср}}$ – средняя длина поверхности охлаждения, $l_{\text{ср}} = R_{\text{ц}} \Delta\varphi$;

$\Delta\varphi$ – угол между двумя радиусами цилиндра, проведенными в концы рассматриваемого элемента шва (рис. 2).

Количество теплоты $dQ_{\text{окр}}$, отведенное в окружающую среду за время dt :

$$dQ_{\text{окр}} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр}})F dt = \alpha(T_{\text{пов}} - T_{\text{окр}}) \cdot 0,25 \cdot 2\pi(R_{\text{ш}} + X)R_{\text{ц}} \Delta\varphi dt.$$

Здесь α – коэффициент теплоотдачи;

$T_{\text{пов}}$ – средняя температура наружной поверхности шва и про-

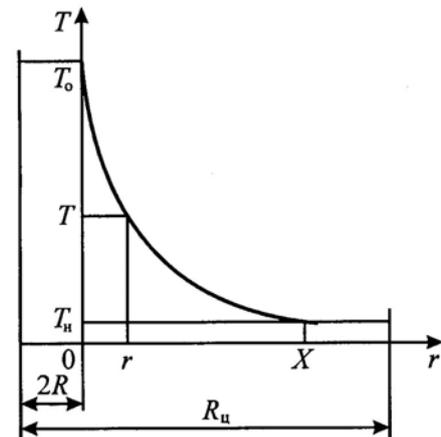


Рис. 1. Распределение температуры по толщине прогретого слоя цилиндра

гретого слоя цилиндра общей площадью $F = 0,25 \cdot 2\pi \times (R_{ш} + X)R_{ц}\Delta\phi$;
 $T_{окр}$ – температура окружающей среды.

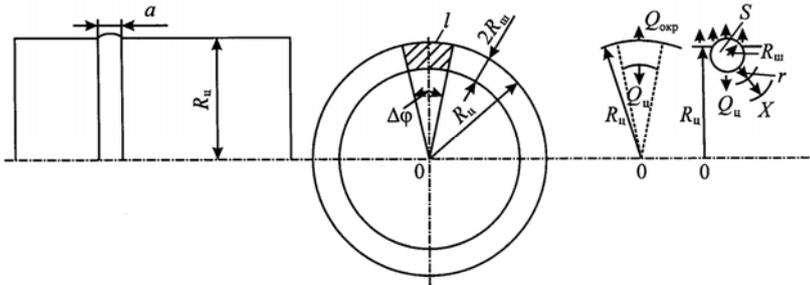


Рис. 2. Схема наплавления металла на поверхность питателя в процессе затвердевания наплавленного шва в цилиндр с учетом общего количества его теплоты $Q_{ш}$ (интенсивность теплоотвода в воздух примерно в 30 раз меньше интенсивности теплоотвода внутрь цилиндра).

Запишем количество теплоты $Q_{ш}$, выделяемое в процессе затвердевания шва:

$$Q_{ш} = (\rho_{ж}c_{ж}\Delta T_{п} + \rho_{т}L)\pi R_{ш}^2 2\pi R_{ц}.$$

Тогда количество теплоты $Q_{ц}$, аккумулированное стенками цилиндра, составит

$$Q_{ц} = Q_{ш} = (\rho_{ж}c_{ж}\Delta T_{п} + \rho_{т}L)\pi R_{ш}^2 2\pi R_{ц}, \quad (3)$$

или

$$Q_{ц} = \rho_0 c_0 (T_{ср} - T_{н}) V_{прог} = \rho_0 c_0 (T_0 - T_{н}) \times \frac{(n+1)^{-1} - (n+2)^{-1} \delta}{1 - 0,5\delta} \pi \left[\pi (R_{ш} + X)^2 R_{ц} - \frac{4}{3} (R_{ш} + X)^3 - 2\pi R_{ш}^2 R_{ц} \right], \quad (4)$$

где ρ_0 и c_0 – плотность и удельная теплоемкость металла при температуре $T_{ср}$;

$T_{ср}$ – средняя температура прогретого слоя цилиндра в процессе затвердевания шва;

$$T_{ср} - T_{н} = (T_0 - T_{н}) \frac{(n+1)^{-1} - (n+2)^{-1} \delta}{1 - 0,5\delta};$$

$$\delta = X / (R_{ш} + X);$$

$V_{прог}$ – объем прогретого в процессе затвердевания шва слоя цилиндра,

$$V_{прог} = \pi \left[\pi (R_{ш} + X)^2 R_{ц} - \frac{4}{3} (R_{ш} + X)^3 - 2\pi R_{ш}^2 R_{ц} \right].$$

Приравняв правые части (3) и (4), после преобразований для процесса затвердевания наплавленного шва получим:

$$(\rho_{ж}c_{ж}\Delta T_{п} + \rho_{т}L)\pi R_{ш}^2 R_{ц} (n+1)(n+2)(2R_{ш} + X) = \rho_0 c_0 (T_0 - T_{н}) [(n+2)R_{ш} + X] \left[\pi (R_{ш} + X)^2 R_{ц} - \frac{4}{3} (R_{ш} + X)^3 - 2\pi R_{ш}^2 R_{ц} \right]. \quad (5)$$

В результате интегрирования (2) и последующих преобразований с учетом (3) найдем время затвердевания наплавленного шва:

$$\tau_3 = \frac{(\rho_{\text{ж}}c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{п}} + \rho_{\text{т}}L)R_{\text{ш}}X}{1,5\lambda(T_0 - T_{\text{н}})n}. \quad (6)$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности металла цилиндра при температуре T_0 .

В табл. 1 для стального цилиндра (радиусом $R_{\text{ц}} = 0,4$ м) и наплавленного на его поверхность шва ($R_{\text{ш}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м) представлены глубина прогреваемого слоя цилиндра в момент окончания процесса затвердевания X_3 , время затвердевания τ_3 и средний перепад температур $(T_{\text{ср}} - T_{\text{н}})$ по толщине прогреваемого слоя цилиндра при различных значениях L и $\Delta T_{\text{п}}$, рассчитанные по формулам (5), (6) и приведенной ниже:

$$(T_{\text{ср}} - T_{\text{н}}) = (T_0 - T_{\text{н}}) \frac{(n+1)^{-1} - (n+2)^{-1} \delta}{1 - 0,5\delta}.$$

Таблица 1

Показатель	Значение показателя при $\Delta T_{\text{п}}$, К	
	50	100
$X_3 \cdot 10^3$, м	4,6/5,0	5,4
τ_3 , с	1,10/1,17	1,22
$(T_{\text{ср}} - T_{\text{н}})$, К	505/500	496

Примечание. 1. В числителе приведены данные для $L \cdot 10^{-5} = 2,9$ Дж/кг, в знаменателе – для 3,3 Дж/кг. 2. При $\Delta T_{\text{п}} = 100$ К имеем $L \cdot 10^{-5} = 3,5$ Дж/кг.

В расчетах приняты следующие значения теплофизических параметров металла цилиндра и шва: $\rho_{\text{ж}} = 7200$ кг/м³; $c_{\text{ж}} = 920$ Дж/(кг·К); $\rho_{\text{т}} = 7500$ кг/м³; $c_0 = 753$ Дж/(кг·К); $T_0 = 1753$ К; $T_{\text{н}} = 293$ К. Показатель $n = 1,5$.

После затвердевания наплавленного металла количество теплоты $Q_{\text{ш}}$, выделяемое при охлаждении шва, определим по формуле

$$Q_{\text{ш}} = (\rho_{\text{ж}}c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{п}} + \rho_{\text{т}}L + \rho_0'c_0'\Delta T_{\text{охл}})\pi R_{\text{ш}}^2 2\pi R_{\text{ц}}. \quad (7)$$

Здесь ρ_0' и c_0' – плотность и удельная теплоемкость металла шва в интервале температур $\Delta T_{\text{охл}} = (T_{\text{с}} - T_0')$;

T_0' – температура шва в процессе охлаждения.

С учетом (7) формулы (5) и (6) принимают следующий вид:

$$(\rho_{\text{ж}}c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{п}} + \rho_{\text{т}}L + \rho_0'c_0'\Delta T_{\text{охл}})\pi R_{\text{ш}}^2 R_{\text{ц}}(n+1)(n+2)(2R_{\text{ш}} + X) = \rho_0 c_0 (T_0 - T_{\text{н}})[(n+2)R_{\text{ш}} + X][\pi(R_{\text{ш}} + X)^2 R_{\text{ц}} - 4/3(R_{\text{ш}} + X)^3 - 2\pi R_{\text{ш}}^2 R_{\text{ц}}]; \quad (8)$$

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{(\rho_{\text{ж}}c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{п}} + \rho_{\text{т}}L + \rho_0'c_0'\Delta T_{\text{охл}})R_{\text{ш}}X}{1,5\lambda(T_0' - T_{\text{н}})n}, \quad (9)$$

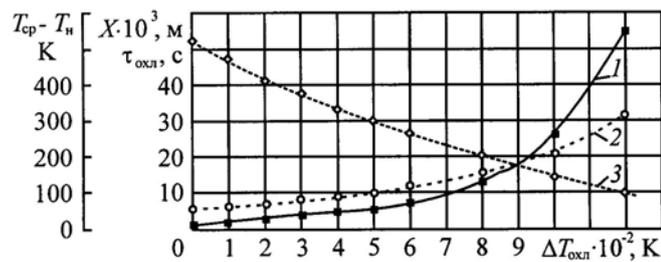
где $\tau_{\text{охл}}$ – время охлаждения шва до температуры T_0' ;

ρ_0 и c_0 – средняя плотность и удельная теплоемкость металла цилиндра в интервале температур $(T_{\text{н}} - T_0')$;

λ – среднее значение коэффициента теплопроводности металла цилиндра в интервале температур $(T_{\text{ср}} - T_0')$, изменяющееся для углеродистой стали в пределах от 65 Вт/(м·К) при температуре порядка 0 °С до 10 Вт/(м·К) вблизи температуры плавления.

Графики, приведенные на рис. 3, иллюстрируют влияние охлаждения наплавленного металла $\Delta T_{\text{охл}} = T_s - T_o'$ на время охлаждения $\tau_{\text{охл}}$, глубину прогреваемого слоя цилиндра X и средний перепад температур $T_{\text{ср}} - T_n$ по толщине прогреваемого слоя. Графики построены по формулам (8) и (9) для $n = 1,5$; $L = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг; $\Delta T_n = 50$ К.

Рис. 3. Зависимость $\tau_{\text{охл}}$ (1), X (2) и $T_{\text{ср}} - T_n$ (3) от $\Delta T_{\text{охл}}$ наплавленного металла



Из представ-

ленных в табл. 1 и на рис. 3 результатов следует, что в течение первых 50 с после наплавки металла средний перепад температур по толщине прогреваемого слоя цилиндра уменьшается от 500 до 100 К, при этом металл шва охлаждается на 1200 К.

При расчете временных напряжений в металле цилиндра (питателя) и шва необходимо выделить два этапа: затвердевание и охлаждение наплавленного металла.

В процессе затвердевания, продолжительность которого ~ 1 с, металл цилиндра около шва прогревается на глубину ~ 5 мм, причем средний перепад температур по толщине прогреваемого слоя достигает ~ 500 К (500 °С) и в дальнейшем уменьшается (табл. 1, рис. 3). Расчеты показывают, что продолжительность роста среднего перепада температур по толщине прогреваемого слоя равна продолжительности затвердевания наплавленного металла. Поэтому можно считать, что в процессе затвердевания наплавленного металла участки цилиндра возле него в среднемгреваются, а после затвердевания в среднем охлаждаются (глубина прогреваемого слоя непрерывно увеличивается в процессе охлаждения после затвердевания, но средний перепад температур по толщине прогреваемого слоя при этом непрерывно уменьшается).

Свободное $\epsilon_{\text{св}}$ и среднее $\epsilon_{\text{ср}}$ относительные расширения прогреваемых участков цилиндра

$$\epsilon_{\text{св}} = \beta(T - T_n); \quad \epsilon_{\text{ср}} = \beta(T^* - T_n), \quad (10)$$

где β — коэффициент линейного расширения;

T^* — среднеинтегральная температура прогреваемого слоя цилиндра вдоль его образующей.

Действительное относительное удлинение ϵ с учетом (10)

$$\epsilon = \epsilon_{\text{св}} - \epsilon_{\text{ср}} = \beta(T - T^*). \quad (11)$$

Найдем T^* интегрированием, используя уравнение (1):

$$T^* = \frac{\int_0^X T dr}{\int_0^X dr} = T_H + \frac{T_0 - T_H}{n+1}. \quad (12)$$

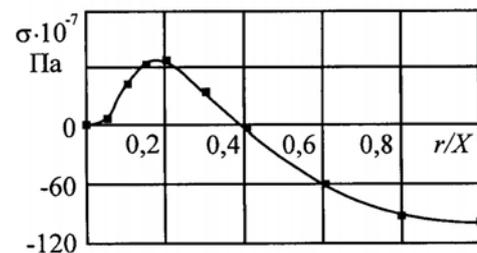
С учетом (11) и (12) получим формулу для расчета временных напряжений σ в прогретом слое цилиндра:

$$\sigma = \beta E(T - T^*) = \beta E(T_0 - T_H) \left[\left(1 - \frac{r}{X}\right)^n - \frac{1}{n+1} \right]. \quad (13)$$

Здесь E – модуль упругости металла цилиндра.

На рис. 4 представлено распределение временных напряжений в прогретом слое по поверхности цилиндра вдоль его образующей для этапа затвердевания металла шва с учетом зависимости β и E от температуры. Для поверхностного слоя цилиндра принято $n = 2,5$. Необходимо отметить, что вблизи шва участки цилиндра испытывают действие напряжений растяжения порядка $2 \cdot 10^7$ Па, а на фронте прогретого слоя – действие напряжений сжатия порядка $100 \cdot 10^7$ Па.

Рис. 4. Распределение временных напряжений σ по толщине прогретого слоя наплавленного металла вдоль образующей поверхности цилиндра питателя



При переходе к охлаждению временные напряжения в прогретом слое цилиндра изменяют знак и могут быть определены по формуле

$$\sigma = \beta E(T - T^*) = \beta E(T_0 - T_H) \left[\frac{1}{n+1} - \left(1 - \frac{r}{X}\right)^n \right]. \quad (14)$$

Переход от этапа затвердевания к этапу охлаждения сопровождается нейтрализацией напряжений (13) напряжениями (14).

Временные напряжения σ в металле наплавленного шва можно оценить по формуле [2]:

$$\sigma = \beta E \Delta T, \quad (15)$$

где ΔT – изменение температуры металла шва в процессе охлаждения.

В табл. 2 приведены рассчитанные по формуле (15) временные напряжения в процессе охлаждения металла шва на величину ΔT . Металл шва при охлаждении испытывает усадку и находится под действием напряжений растяжения. При высоких температурах он обладает высокими пластическими свойствами, поэтому при напряжениях, соответствующих пределу текучести для заданной температуры, металл «течет» и временные напряжения снижаются до значения предела текучести. По мере охлаждения пла-

стические свойства уменьшаются и временные напряжения могут достигать значений предела прочности. В этом случае в поверхностном слое цилиндра будут возникать трещины. После полного охлаждения в поверхностном слое имеют место остаточные напряжения. Для их устранения необходим отпуск.

Для исключения трещинообразования рекомендуется перед наплавкой металла на поверхность питателя предварительно его подогреть до 200...500 °С или более. Данная рекомендация основана на том факте, что предварительный подогрев снижает максимальную величину ΔT в соотношении (10) и, соответственно, временные напряжения до значений менее предела прочности.

Таблица 2

Временные напряжения в металле шва в процессе его охлаждения

ΔT , К	100	200	300	400	500	600	800
$\sigma \cdot 10^{-7}$, Па	0,3	1,0	4,0	25,5	50,2	82,7	146,0

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая рассчитать время затвердевания наплавляемого металла, глубину прогретого слоя питателя, средний перепад температур по его толщине и временные напряжения в процессе охлаждения после наплавки металла.

2. Дано обоснование предварительного подогрева питателя перед наплавкой металла с целью исключить трещинообразование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейник, А.И. Теория затвердевания отливки [Текст] / А.И. Вейник. – М.: Машгиз, 1960. – 434 с.
2. Константинов, А.С. Напряжения, деформации и трещины в отливках [Текст] / А.С. Константинов, А.П. Трухов. – М.: Машиностроение, 1981. – 198 с.

Поступила 17.10.05

Yu.M. Yurin, V.I. Malygin

«Sevmashvtuz», Branch of Saint-Petersburg State Marine Technical University

To Computation of Voltages in Overlaying of Feeders in Pulp-and-paper Production

The computation technique of heat processes and voltages in overlaying metal on cylindrical surfaces of feeders in pulp-and-paper productions is developed, as well as recommendations for increasing their operation reliability.

Keywords: feeders of pulp-and-paper production, temperature, voltages, overlay, heat quantity.

