На рис. 2 показано влияние размеров каналов r и глубины их заложения δ на величину параметра A. Из рассмотрения кривых следует, что при небольшой глубине заложения каналов и шага их расположения A мало зависит от радиуса канала в случае $r > 0,04$ м. Однако с уменьшением радиуса канала за пределы 0,01 м термическое сопротивление пода резко возрастает и при $r \to 0$ величина $A \to \infty$. При значительной глубине заложения каналов $(\delta > 0,3\text{ м})$ термическое сопротивление пода существенно зависит от радиуса каналов во всем исследованном диапазоне.

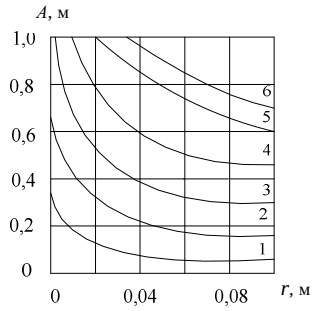


Рис. 2. Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при высоте каналов 0,25 r и шаге их расположения 0,2 м:

$1-\delta = 0,05;\ 2-0,15;\ 3-0,25;\ 4-0,35;\ 5-0,45;\ 6-0,50$ м

Влияние шага расположения каналов при различной их форме (соотношение h и r) на величину параметра A отражено на рис. 3. Из анализа графика следует, что шаг расположения каналов оказывает определяющее влияние на величину термического сопротивления пода при любом соотношении параметров r и h. От формы же каналов термическим сопротивление пода зависит в меньшей степени. Наибольшим термическим сопротивлением обладает под, оснащенный круглыми каналами $(h = 2r)$. С приданием каналу сегментной формы термическое сопротивление пода снижается. Однако при $h < 0,5$ термосопротивление остается практически неизменным.

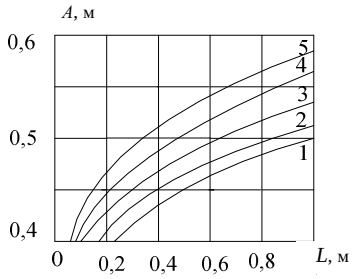


Рис. 3. Влияние радиуса канала на величину термического сопротивления пода при глубине заложения каналов 0,25 м и их радиусе 0,08 м:

$1-h = 0,25;\ 2-0,5;\ 3-1,0;\ 4-1,5;\ 5-2r$ (круглый канал)

Таким образом, путем математического моделирования исследовано влияние конструктивных параметров канального пода формы каналов, шага их расположения и глубины заложения на величину термического сопротивления тепловому потоку в пределах участка поверхность канала (рабочей поверхности пода). На основе численного решения разработанной математической модели установлена связь между всеми конструктивными, теплофизическими и технологическими характеристиками печи, оснащенной канальным подом и зоной термостатирования. Замкнутость связи обеспечивается дополнением результатов численного решения математической модели данными, полученными при аналитическом или численном решении уравнения Лапласа. Установленная функциональная связь может быть использована для расчета любых из включенных в нее параметров при условии, что все остальные известны или заданы. Например, при проектном расчете могут быть найдены размеры каналов, глубина их заложения и шаг расположения, а также длина зоны нагрева для заданной производительности. При разработке режимов работы уже существующей печи можно найти оптимальную температуру газов в каналах и в рабочем пространстве печи при известном расходе газов и производительности нагрева. Кроме того, полученные результаты могут использоваться для анализа взаимосвязи отдельных параметров печи.

Литература

1. *Рыжов, А.Ф.* Теоретическое определение угара при нагреве слитков в нагревательных колодцах / А.Ф. Рыжов, А.Н. Минаев, Н.П. Свинолобов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 8. – С. 113 – 117.

2. *Шестаков, Н.И.* Инженерная методика расчета термосопротивления канального пода методической нагревательной печи толкательного типа / Н.И. Шестаков, М.И. Летавин, А.И. Фоменко // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 4. – Т. 3. – С. 28 – 31.

УДК 669.02/09

Н.И. Шестаков, Н.К. Лопатина, А.И. Фоменко, Н.Г. Колбасников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БАНДАЖИРОВАННЫХ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

На основе математического моделирования исследовано влияние конструктивных характеристик бандажа и режимов термоструктурной обработки на величину усадки колец.

Температура, бандаж, ролик, напряжение.

The influence of constructive characteristics of bandage and regimes of thermo-structural processing on the shrinkage of the rings measure is investigated in the article based on mathematical simulation.

Temperature, bandage, roller, stress.

Бандажированные ролики имеют высокую термоциклическую долговечность, что достигается за счет снижения почти до нуля осевых напряжений в поверхностных слоях. Другим достоинством роликов с разрезным бандажом является раздельная тепловая деформация колец, что существенно уменьшает суммарный температурный прогиб ролика.

В настоящее время наиболее часто сборку бандажированных роликов осуществляют методом горячей посадки с натягом. Недостаток способа – значительная его трудоемкость, особенно при использовании разрезных бандажей. В процессе нагрева посадочные поверхности деформируются, вследствие чего бандажные кольца иногда разрушаются. Предупредить разрушение колец можно путем снижения величины гарантированного натяга. Однако в этом случае в процессе эксплуатации ролика кольца могут проскальзывать.

Для повышения качества посадки бандажа на ось ролика предложено наружную поверхность оси предварительно покрывать слоем мягкого материала, например, медью или алюминием. При посадке металл сминается и заполняет неровности в зоне контакта оси с бандажом.

В более совершенном виде технология горячей посадки бандажа на ролик с использованием промежуточного слоя разработана в Германии. По этой технологии на наружную поверхность оси методом плазменного напыления наносят слой промежуточного металла толщиной 0,1 мм, а затем рабочий слой – толщиной 0,2 мм. При напылении рабочего слоя вводят твердые частицы из карбидов вольфрама. После горячей посадки бандажа на ось твердые частицы рабочего слоя внедряются в поверхностный слой бандажа и, тем самым, обеспечивают надежность контакта. Для смены изношенного бандажа на его поверхности делают надрез параллельно продольной оси, в результате концентраций внутренних напряжений кольцо разрушается, и его заменяют новым. Однако вследствие значительной сложности технологии способ посадки бандажа на ось с использованием промежуточного слоя до сих пор не нашел практического применения.

В Японии разработана уникальная технология изготовления бандажированного ролика с использованием электронной пушки. Электронный пучок прожигает бандаж до материала оси ролика, а образовавшийся канал заполняется расплавленным металлом бандажа, который, кристаллизуясь, формирует мягкий слой, имеющий аустенитную структуру. Пушка постепенно поднимается к поверхности ролика и за счет изменения теплоотвода часть аустенитной структуры превращается в отпущенный бейнит, образуя твердый слой. Получаемые таким способом сварные столбики располагают в шахматном порядке. Недостатком описанной технологии можно считать сложность ее широкого применения в условиях металлургических предприятий.

Из приведенного краткого анализа следует, что наиболее перспективными следует считать разрезные бандажи, охлаждаемые осью ролика за счет теплопроводности. Такие бандажи имеют лишь один недостаток – высокую трудоемкость их изготовления. В этой связи задача поиска новых способов сборки бандажированных роликов представляется актуальной.

Как показали проведенные нами экспериментальные исследования [3], [4], в качестве одного из таких способов может быть использована термоструктурная осадка бандажей. Здесь уменьшение посадочного диаметра происходит под действием двух факторов: в результате односторонней пластической деформации, вызванной температурным градиентом, и вследствие структурных превращений в металле бандажа.

Исследования показывают, что превалирующим является первый фактор. На величину усадки существенное влияние оказывает глубина прогрева стенки и ее толщина. Глубина проникновения тока высокой частоты может быть определена по известной формуле [1]:

$$\delta_э = 50300\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, μ – магнитная проницаемость, f – частота тока.

При температуре 1000 °С глубина проникновения тока в легированную сталь приблизительно составит:

$$\delta_э = 600/\sqrt{f}.$$

Известно, что в настоящее время установлены функциональные зависимости вида:

$$\delta_э = \delta_э(f),\ \delta_y = \delta_y(L, D, d, \delta_m),\ W = W(\delta_э, \tau),$$

где δ_y – величина усадки кольца вследствие термоструктурной обработки; L – длина кольца; D, d – наружный и внутренний диаметр кольца; δ_m – глубина прогрева кольца; W – удельная электрическая мощность; τ – время.

Однако связь величины усадки колец с технологическими режимами обработки изучена слабо. Особенно это относится к области бандажированных роликов машин непрерывного литья заготовок. Представляет практический и научный интерес установление связи величины усадки с технологически-

ми режимами термоструктурной обработки бандажных колец.

Точное решение задачи расчета бандажа в процессе его термообработки, вследствие ее высокой сложности, не представляется возможным. При выполнении приближенного расчета были сделаны следующие допущения:

– бандаж представляет собой цилиндрическую оболочку вращения;

– рассматривались деформации (вследствие нагрева и последующего охлаждения) участков оболочки, достаточно удаленных от ее краев, что позволяло исключить влияние «краевых эффектов»;

– перемещения в направлении от оболочки предполагались равными нулю;

– материал бандажа рассматривался как упругопластичный.

Процесс термообработки бандажа рассматривался состоящим из двух этапов: квазистационарный нагрев локальной зоны бандажа кольцевым индуктором установки ТВЧ, перемещающимся вдоль бандажа и квазистационарное охлаждение локальной зоны разбрызгиванием воды на наружной поверхности бандажа.

Цель расчета – определение изменения внутреннего диаметра бандажа после его термообработки.

Распределение температуры по толщине стенки определяется соотношением:

$$T = \begin{cases} T_н \ \text{ при } \ D_H - 2\delta_п \le D \le D_н \\ T(D) \ \text{ при } \ D_в \le D \le D_H - 2\delta_п \end{cases}, \qquad (1)$$

где

$$T(D) = \frac{T_н \ln\frac{D}{D_в} + T_в \ln\frac{D_н - 2\delta_п}{D}}{\ln\frac{D_н - 2\delta_п}{D_в}}.$$

При охлаждении бандажа (считая процесс квазистационарным) температуру наружной поверхности бандажа полагаем равной $T_н$; температура внутренней поверхности ($T_в$) та же, что и в процессе нагрева. Распределение температуры по толщине бандажа определится соотношением:

$$T(D) = \frac{T_н \ln\frac{D}{D_в} + T_в \ln\frac{D_в}{D}}{\ln\frac{D_н}{D_в}}. \qquad (2)$$

Разбивая бандаж на ряд тонкостенных слоев, для отдельного случая получим соотношения [2], [3]:

$$\sigma_r = \frac{\alpha(t)E(t)\Delta t}{2[1-\mu(t)]\left[(r_в+\Delta r)^2 - r_в^2\right]\times\ln\left(1+\frac{\Delta r}{r_в}\right)}\times$$
$$\times\left[r_в^2\ln\frac{r}{r_в} + (r+\Delta r)\ln\frac{r+\Delta r}{r} - \frac{r_в^2(r_в+\Delta r)^2}{r^2} + \right.$$
$$\left. + \ln\frac{r_в+\Delta r}{r_в}\right], \qquad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha(t)E(t)\Delta t}{2[1-\mu(t)]\left[(r_в+\Delta r)^2 - r_в^2\right]\times\ln\left(1+\frac{\Delta r}{r_в}\right)}\times$$
$$\times\left[\begin{array}{l}(r_в+\Delta r)^2\ln\frac{r_в+\Delta r}{r} + r_в^2\ln\frac{r}{r_в} - \\ -\left[(r_в+\Delta r)^2 - r_в^2\right] + \\ +\frac{r_в^2(r_в+\Delta r)^2}{r^2}\times\ln\frac{r_в+\Delta r}{r_в}\end{array}\right], \qquad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha(t)E(t)\Delta t}{2[1-\mu(t)]\left[(r_в+\Delta r)^2 - r_в^2\right]\ln\frac{r_в+\Delta r}{r}}\times$$
$$\times\left[2(r_в+\Delta r)^2\ln\frac{r_в+\Delta r}{r} + r_в^2\ln\frac{r}{r_в} - (r_2^2 - r_1^2)\right]. \qquad (5)$$

Условия начала пластических деформаций (в форме Сен-Венана):

$$\sigma_i \ge \sigma_t, \qquad (6)$$

где интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2}. \qquad (7)$$

Границу между областью упругой и пластической деформации найдем из соотношения:

$$P = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(2\ln\frac{D_п}{D_в} - \frac{D_п^2}{D_н^2}\right) + 1. \qquad (8)$$

Здесь P – внутреннее давление, действующее по поверхности D_B. В нашем случае при выполнении условия (6) величину P можно рассматривать как сопротивление слоев металла вблизи внутренней поверхности бандажа смещению вследствие пластической деформации:

$$P = \sigma_T. \qquad (9)$$

Тогда на основе (8) получаем нелинейное уравнение:

$$2\ln\frac{D_п}{D_в} - \frac{D_п^2}{D_н^2} + 1 - \sqrt{3} = 0. \qquad (10)$$

При наличии области пластической деформации соотношения для определения нормальных напряжений принимают вид.

Для упругой области:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(\frac{D_п}{D_н}\right)^2\left[1-\left(\frac{D_н}{D}\right)^2\right]; \qquad (11)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(\frac{D_п}{D_н}\right)^2\left[1+\left(\frac{D_н}{D}\right)^2\right]; \qquad (12)$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(\frac{D_п}{D_н}\right)^2. \qquad (13)$$

Для пластической области:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(2\ln\frac{D}{D_H}+\left(\frac{D_п}{D_H}\right)^2-1\right); \qquad (14)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(2\ln\frac{D}{D_п}+\left(\frac{D_п}{D_H}\right)+1\right); \qquad (15)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}\left(2\ln\frac{D}{D_п}+\left(\frac{D_п}{D_H}\right)^2\right). \qquad (16)$$

Здесь D – текущий диаметр:

$$D_в \le D \le D_H .$$

Из соотношений (10) – (16) определено выражение для вычисления относительной линейной деформации средней линии сечения бандажа:

$$\varepsilon_\theta = \frac{(P_B - P_H)R_{ср}\int\alpha(z)T(z)E(z)dz}{\int E(z)dz}. \qquad (17)$$

Здесь P_B и P_H – внутреннее и наружное давления.

Приведенные выше соотношения использованы для расчета изменения внутреннего диаметра бандажей с наружным диаметром D_H = 270 мм и внутренними диаметрами D_B = 210 мм, 230 мм, 250 мм. Температура наружной поверхности при нагреве бандажа установкой принималась равной: 700, 800, 200, 1000, 1100° С. Глубина прогрева стенки бандажа при обработке током высокой частоты принималась равной: 5, 10, 15 мм (по паспортным данным установки). При выполнении численного интегрирования в соотношениях (17) использован методом Симпсона с разбиением участка интегрирования на 24 шага.

Из результатов математического моделирования следует, что температура нагрева образца в зоне термообработки оказывает существенное влияние на величину усадки лишь при обработке колец толщиной 20 мм. С увеличением глубины нагрева кольца (которая определяется частотой ТВЧ) степень усадки кольца возрастает. При термоструктурной обработке толщиной колец 10 и 30 мм на многих режимах возникает отрицательная усадка («разбухание»).

Литература

1. *Головин, Г.Ф.* Высококачественная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М.М. Замятин. – М., 1990.

2. *Шестаков, Н.И.* Особенности усадки бандажных колец при термоструктурной сборке роликов / Н.И. Шестаков, В.А. Андронов, В.Я. Тишков, Ю.И. Иванов // Металлы. – 1993. – № 6. – С. 161 – 167.

3. *Шестаков, Н.И.* Управление тепловыми процессами, протекающими при изготовлении бандажированных роликов / Н.И. Шестаков, Н.К. Лопатина, Г.И. Петрова // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования. – Вологда, 2012. – С. 56 – 59.

4. *Шестаков, Н.И.* Термоструктурная обработка бандажированных роликов в процессе их сборки / Н.И. Шестаков, А.М, Сорокин, Ю.И. Иванов // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин. – Волгоград, 1991. – С. 174 – 175.

5. *Шестаков, Н.И.* Технология изготовления бандажированных роликов / Н.И. Шестаков, В.Я. Тишков, Ю.И. Иванов, В.А. Андронов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 3. – С. 19 – 23.