

Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.,
Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.,
Гончаров М.С., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

КОНТАКТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАРАБАНАХ

msgon@ya.ru

Рассмотрено влияние погрешности формы и расположения на контактную прочность рабочих поверхностей опорного ролика и бандажа технологического барабана. Составлены расчетные модели позволяющие учитывать влияние на пятно контакта ошибок расположения ролика связанных с погрешностями монтажа или податливостью основания. Проанализированы закономерности изменения контактных напряжений при различных погрешностях формы бандажа. Расчеты выполнены в среде NX Advanced Simulation Расширенная симуляция (Siemens PLM Software Inc.).

Ключевые слова: роликоопоры, бандажи, оси, контактная прочность, пятно контакта, погрешности формы и расположения.

Погрешности формы и расположения деталей опор технологических барабанов, таких как бандажи и опорные ролики, могут возникать как в результате погрешностей при их изготовлении, так и в процессе монтажа и эксплуатации вследствие износа, пластических деформаций и других повреждений. Это негативно влияет на функционирование агрегата - нарушается номинальный контакт деталей опор, изменяется их заданное расположение, увеличивается неравномерность распределения нагрузки и как следствие интенсивность износа, появляются пластические деформации и потери на трение [1, 2].

Кроме того погрешности расположения могут быть связаны с упругими деформациями деталей и выборки зазоров при нагружении. Такие погрешности трудно идентифицировать в процессе эксплуатации ввиду их малости и поэтому требуется заранее, ещё на стадии проектирования, оценить влияние каждой из них на функционирование машины и по возможности сформулировать условия предупреждающие повреждения деталей.

В технологических барабанах погрешности формы и расположения бандажа 1 и ролика 2 (рис. 1) существенно изменяют характеристики зоны контакта. Поэтому для оценки их влияния на интенсивность износа, выкрашивания, появления пластических деформаций будем использовать величину контактных напряжений и анализировать закономерности их распределения по изменениям формы и размеров пятна контакта.

Прежде всего, рассмотрим эти проявления при различных отклонениях от номинального положения ролика относительно бандажа технологического барабана (при отсутствии погрешности их формы). Как правило,

роликоопора технологического барабана состоит из рамы 3 и двух блоков, в каждом из которых установлен опорный ролик 2 с осью, опирающейся на два подшипника. Ошибки расположения контактной поверхности ролика выразим через погрешности расположения подшипниковых опор его оси. Для этого сначала свяжем неподвижную систему координат ZXY (рис. 1 и 2) с бандажом в т. O_3 – центре симметрии бандажа и ролика. Как погрешности расположения ролика будем определять перемещения опор А и В оси ролика в осевом, поперечном и радиальном направлениях.

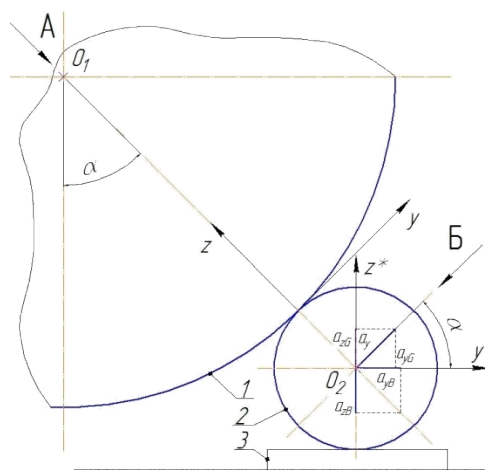


Рис. 1. Схема ошибок положения ролика:

А) поворот вокруг оси Z; Б) поворот вокруг оси Y

Рассмотрим частный случай погрешности расположения опорных поверхностей, при котором возникает поворот ролика вокруг оси O_3Z . Свяжем с опорой ролика в т. O_2 (рис.1) подвижную систему координат $Z^*X^*Y^*$. Тогда перемещение т. А в плоскости XO_3Y (рис. 2) : $a_y = L \cdot \sin(\gamma)$, в осевом направлении (вдоль оси O_3X или O_2X^*): $a_{xG} = L - L \cdot \cos(\gamma)$, в

поперечном (вдоль оси O_2Y^*) и радиальном (вдоль оси O_2Z^*) направлениях соответственно: $a_{yG} = L \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha)$, и $a_{zG} = L \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\alpha)$.

Например, для $L = 1300$ мм при повороте на один градус ($\gamma = 1^\circ$) вокруг оси O_3Z получим смещение (ошибку положения) опоры в поперечном направлении $a_{yG} = 19,6$ мм, в радиальном $a_{zG} = 11,3$ мм и осевом $a_{xG} = 0,2$ мм.

Проведем анализ контактных напряжений с помощью конечно-элементной модели [3] в NX Advanced Simulation Расширенная симуляция (Siemens PLM Software Inc.) при условии, что материал ролика сталь 30ГСЛ по ГОСТ 977-88, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$, а модуль продольной упругости $E=2 \cdot 10^5$ МПа.

Так как нагрузка от ТБ действует на внутреннюю поверхность бандажа, считаем, что она равномерно распределяется по внутренней поверхности сегмента и направлена вертикально вниз. Для опоры вращающейся печи 5x185 м она будет равна $F=4$ МН.

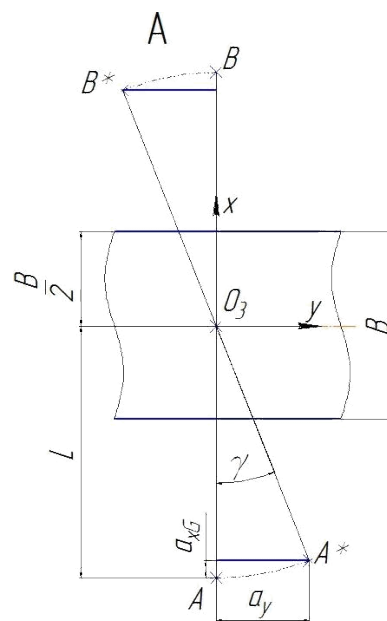


Рис. 2. Схема ошибок при повороте ролика вокруг оси O_3Z

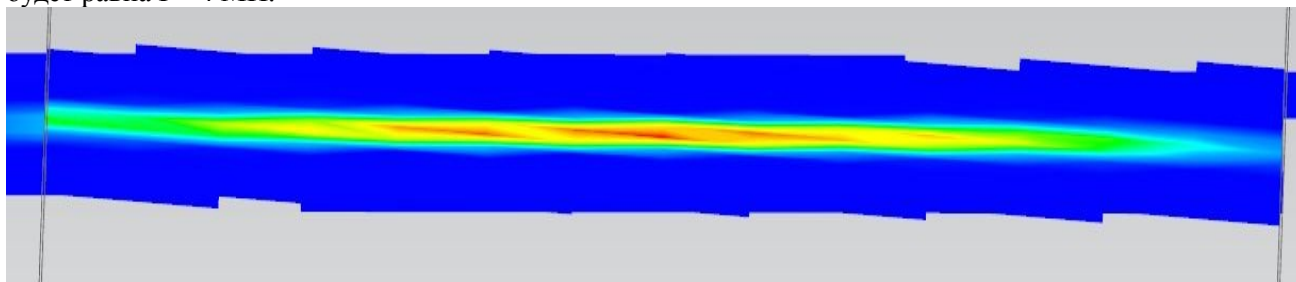


Рис. 3 Карта контактных давлений при повороте ролика на 3°

Результаты расчетов (рис. 3) показывают: 1) длина пятна контакта при повороте осей от $\gamma = 0$ до $\gamma = 3^\circ$ не изменяется; 2) наименьшие напряжения возникают на концах контактной линии, а по ее длине изменяются не равномерно; 3) максимальные напряжения возникают в центре поворота осей и на 25–30 % (при $\gamma = 3^\circ$) превышают напряжения при параллельных осях ($\gamma = 0$).

Кроме того, следует учесть, что поворот на угол $\gamma = 3^\circ$ возможен вследствие весьма существенных ошибок положения ($a_{yG} = 59,0$ мм, $a_{zG} = 34$ мм и осевом $a_{xG} = 1,8$ мм), которые идентифицируются современными измерительными приборами и исправляются регулировочными элементами, входящими в конструкцию опоры.

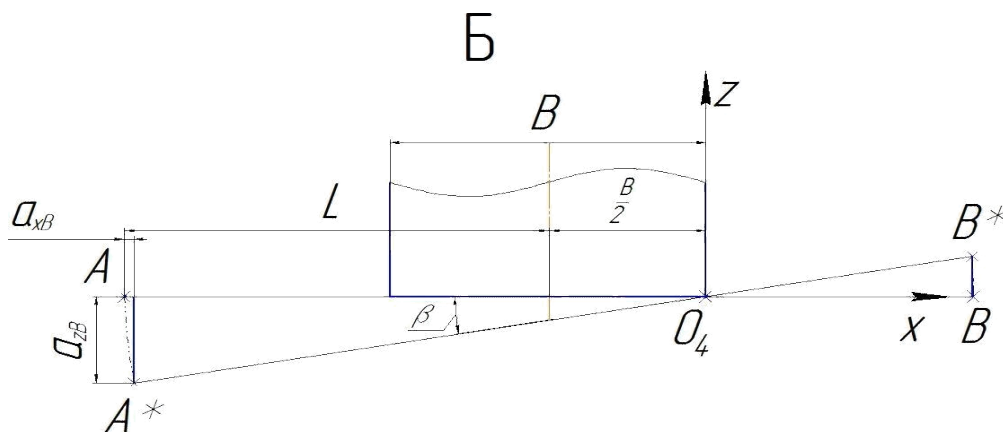


Рис. 4. Схема ошибок при повороте ролика вокруг оси O_4Y

Рассмотрим второй частный случай поверхностей, когда оси бандажа и ролика лежат в одной плоскости и не параллельны. Для этого погрешности расположения опорных

связем неподвижную систему координат ZXY (рис. 4) с бандажом 1 в т. O₄. Перемещения опоры т. А в плоскости ZO₄X при повороте образующей ролика АВ на угол β вокруг оси O₄Y в осевом (вдоль оси O₂X*), поперечном (вдоль оси O₂Y*) и радиальном (вдоль оси O₂Z*) направлениях соответственно:

$$a_{xB} = (L+B/2) \cdot (1 - \cos(\beta)), a_{yB} = (L+B/2) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\alpha), a_{zB} = (L+B/2) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha).$$

Например, для L = 1300 мм при повороте на один градус (β = 1°) вокруг оси O₄Y получим смещение (ошибку положения) опоры в поперечном направлении a_{yB} = 15,7 мм, в радиальном a_{zB} = 27,2 мм и осевом a_{xB} = 0,3 мм.

Результаты расчетов (рис. 5) показывают: 1) длина пятна контакта, его форма и площадь существенно уменьшаются даже при незначительном повороте на доли градуса; 2) напряжения по длине ролика распределяются неравномерно; 3) максимальные напряжения перманентно возрастают в центре поворота и уже при угле β = 0,003° более чем в два раза превышают напряжения при параллельных осях (β = 0); 4) ошибки положения ролика при повороте больше, чем β = 0,004° вызывают опасные для контактной прочности поверхности напряжения.

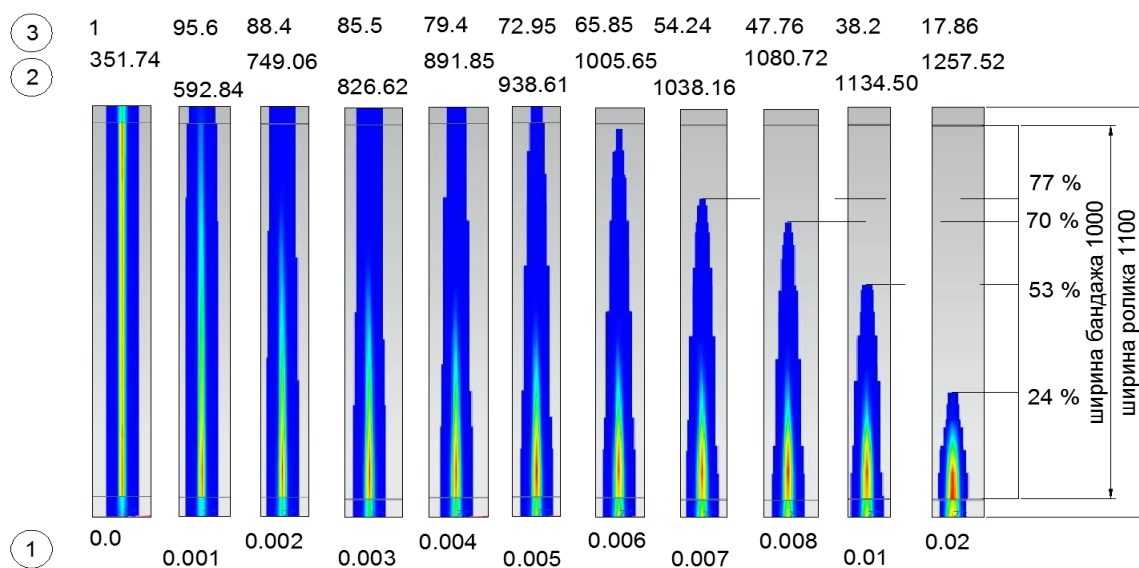


Рис. 5. Параметры пятна контакта при повороте на угол β:

1 – угол β в долях градуса; 2 – максимальное на пятне контактное напряжение МПа; 3 – изменение площади пятна контакта в %

Таким образом, эти ошибки положения с одной стороны оказывают большее влияние на работоспособность конструкции, чем в первом рассмотренном случае, а с другой – являются меньшими по абсолютной величине (при β = 0,004° получим a_{yB} = 0,063 мм, a_{zB} = 0,11 мм, a_{xB} = 0,0 мм), что затрудняет их определение и устранение в практических условиях. Кроме того по абсолютной величине рассмотренные ошибки находятся в пределах упругих деформаций деталей роликоопоры. Поэтому рассмотренные явления при повороте на угол β могут быть результатом не столько ошибок положения, сколько проявлением упругих свойств конструкции.

Перейдем к анализу контакта при условиях: 1) ошибки расположения отсутствуют; 2) форма и размеры ролика номинальны, а бандаж имеет ошибки формы; 3) безцентровое вращение не изменяет нагружение поверхности контакта. Найдем закономерность изменения контактных напряжений в зависимости от формы

поперечного сечения бандажа с номинальным радиусом R_H.

Постоянные контактные напряжения при контакте деталей номинальной формы по формуле Герца:

$$\sigma_H = B \cdot [(R_H + R_l)/(R_l \cdot R_H)]^{1/2}, \quad (1)$$

где B – параметры, не связанные с формой поперечного сечения, R_l – номинальный радиус ролика.

Контактные напряжения на участках с отклонениями от круглости бандажа при радиусе r кривизны его поверхности в точке контакта:

$$\sigma_{HR} = B \cdot [(r + R_l)/(R_l \cdot r)]^{1/2} \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем:

$$\sigma_{HR} = \sigma_H \cdot K_{HR} \quad (3)$$

здесь K_{HR} – безразмерный коэффициент, демонстрирующий закономерность изменения контактных напряжений в зависимости от ошибок формы бандажа:

$$K_{HR} = [(1 + R_l/r)/(1 + R_l/R_H)]^{1/2}$$

Для удобства анализа обозначим: $k = R_i / R_H$ и $i = R_H / r$.
тогда:

$$K_{HR} = [(1 + k \cdot i) / (1 + k)]^{1/2} \quad (4)$$

Из (4) и (3) следует, что контактные напряжения σ_{HR} будут переменны, если изменяется r (рис. 6). Изменение напряжений

тем существеннее, чем больше разница между номинальным радиусом и радиусом кривизны. При этом $K_{HR} \rightarrow \max$ и $\sigma_{HR} \rightarrow \max$ при $r \rightarrow \min$. Таким образом, необходимо найти закономерности изменения радиуса поверхности контакта вследствие ошибок формы.

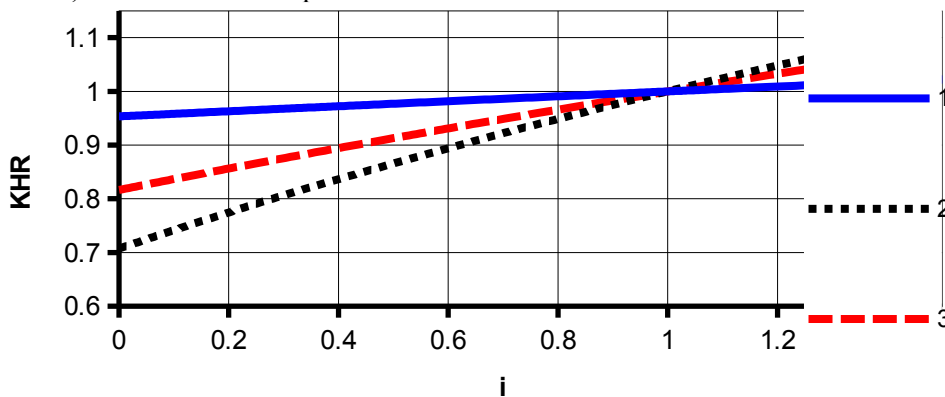


Рис. 6. Коэффициент изменения контактных напряжений в зависимости от отношения радиусов кривизны i при отношении номинальных радиусов: 1 – $k=0,1$; 2 – $k=1$; 3 – $k=0,5$

Составляя для этого расчетные модели, исключим из рассмотрения локальные неровности в виде раковин, пластические деформации поверхности в форме дорожек или вмятин, различные царапины и следы задира. Будем также исходить из того, что механическая обработка поверхности при изготовлении и ее износ при длительной эксплуатации сглаживают неровности в виде уступов, заострений и впадин.

Будем задавать форму поперечного сечения в полярных координатах: $\rho = R_0 + S(\varphi)$, где ρ -

радиус-вектор, R_0 – минимальный радиус, $S(\varphi)$ – аппроксимирующая функция.

Рассмотрим, например, отклонение от круглости (рис. 7, а) $\Delta = R_H - R_0$, где R_H – номинальный радиус.

Для этого случая в силу симметрии достаточно проанализировать контактные напряжения только на трех участках. Границы этих участков для первой четверти обозначим центральными углами β_1, β_2 и β_3 (рис. 7, а). Радиус $\rho = R_H$ остается постоянным только на втором участке.

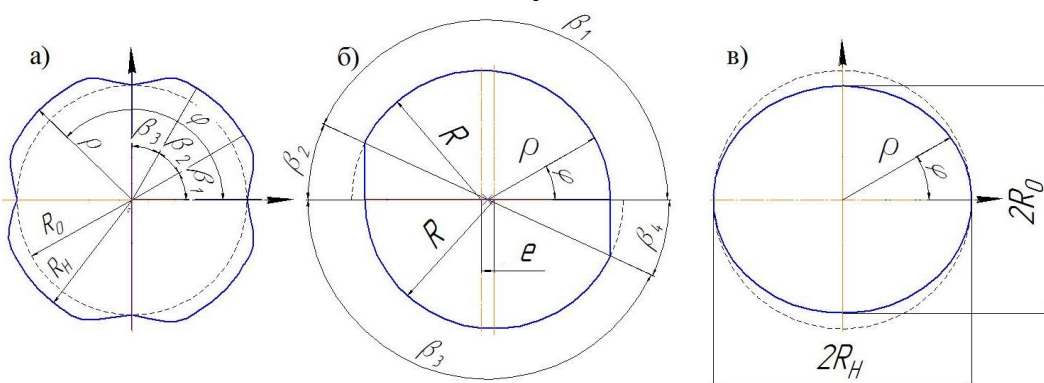


Рис. 7. Варианты погрешности формы: а – отклонение от круглости с переменными радиусами; б – отклонение от круглости с постоянным радиусом и лысками; в – овальность

На первом и третьем участке радиус ρ изменяется и поэтому не равен радиусу r кривизны поверхности в точке контакта:

$$r = [\rho(\varphi)^2 + (d\rho(\varphi)/d\varphi)^2]^{3/2} / (\rho(\varphi)^2 + 2 \cdot (d\rho(\varphi)/d\varphi)^2 - \rho(\varphi) \cdot (d^2\rho(\varphi)/d\varphi^2)), \quad (5)$$

$$\text{где } \rho = R_0 + \Delta \cdot 0,5 \cdot (1 - \cos(\pi \cdot \varphi / \beta_1)), \quad (6)$$

$$d\rho(\varphi)/d\varphi = [\pi \cdot \Delta \cdot \sin(\pi \cdot \varphi / \beta_1)] / (2 \cdot \beta_1), \quad d^2\rho(\varphi)/d\varphi^2 = [\pi^2 \cdot \Delta \cdot \cos(\pi \cdot \varphi / \beta_1)] / (2 \cdot \beta_1^2).$$

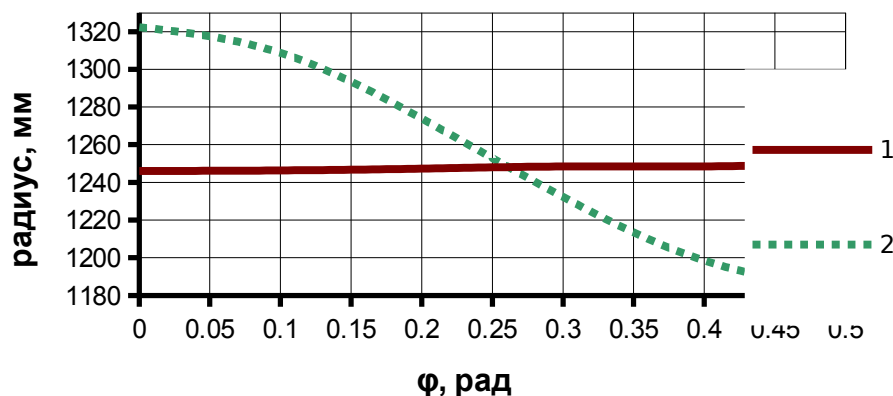


Рис. 8. Изменение радиусов при отклонении от круглости на первом участке от 0 до $\pi/3$:

1 – радиус детали $\rho(\varphi)$; 2 – радиус кривизны поверхности детали $r=\rho(\varphi)$

Например, при $R_H=1250$ мм и степени точности 16 отклонение $\Delta = 4$ мм и $R_0=1246$ мм. Тогда при $\beta_1 = \pi/6$ из (5) получим $r_{\min} = 1182,55$ мм ($i = 1,057$) и $r_{\max} = 1322,42$ мм ($i = 0,945$). Используя (3) и (4) получаем, что контактные напряжения на этом участке могут изменяться на 2,8 % (рис. 8).

Рассмотрим следующий пример, в котором отклонение от круглости связано с погрешностью соединения между собой двух цилиндрических круговых сегментов с одинаковым радиусом R (рис. 7б). При несоосности e частей возникает выступ такой же величины. Будем считать, что при механической обработке и дальнейшей эксплуатации он преобразуется в гладкую площадку (лыску), которую можно аппроксимировать уравнением (6). Ошибка формы конечно сохраняется. Отклонение от круглости $\Delta = e$.

Радиус r кривизны поверхности независимо от расположения оси вращения будет переменным только на лысках. Поэтому только на этих участках контактные напряжения σ_{HR} будут незначительно изменяться. На остальной поверхности кривизна сохраняется постоянной и равной радиусу R .

Если же круговые сегменты выполнены с погрешностями, то следует использовать уравнения, рассмотренные для первого примера.

Во многих случаях отклонение формы определяют овальностью (рис. 7, в). Аппроксимируем овальность кривой четвертого порядка в виде одного из овалов Кассини:

$$\rho = [c^2 \cdot \cos(2\varphi) + h^{0.5}]^{0.5} \quad (7)$$

здесь $h = c^4 \cdot (\cos(2\varphi))^2 + a^4 - c^4$, $c > 0$, $a > c \cdot (2)^{0.5}$, $a = (R_H^2 - c^2)^{0.5}$, $R_0 = (a^2 - c^2)^{0.5}$. Например, при $R_H=1250$ мм произвольно принимаем $c=71$, тогда

$a = 1248 > 100,41$ и $R_0 = 1245,961$ мм, т.е. овальность $\Delta = 8,08$ мм.

Для определения радиуса кривизны дифференцируем дважды выражение (7):

$$d\rho(\varphi)/d\varphi = A / (2\rho) \quad (8)$$

здесь

$$A = -c^4 \cdot \sin(4\varphi) / h^{0.5} - 2c^2 \cdot \sin(2\varphi), \quad d^2\rho(\varphi)/d\varphi^2 = B / (2\rho) - A / [4(c^2 \cdot \cos(2\varphi) + h^{0.5})^{3/2}], \quad (9)$$

где

$$B = \{4c^4 \cdot [\sin(2\varphi)]^2 - 4c^4 \cdot [\cos(2\varphi)]^2\} / h^{0.5} - c^8 \cdot [\sin(4\varphi)]^2 / h^{3/2} - 4c^2 \cdot \cos(2\varphi).$$

Выражения (7), (8), (9) и (5) позволяют определить закономерность изменения радиуса кривизны и контактных напряжений для случая овальности бандажа. Результаты $r_{\min} = 1242$ мм ($i = 1,057$) и $r_{\max} = 1254$ мм ($i = 0,945$), $K_{HR} \cong 1$ демонстрируют, что изменение напряжений по величине незначительно, но они распределяются неравномерно по поверхности в зоне контакта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Щетинин Н.А. Исследование изменений напряженно-деформированного состояния бандажей при их реконструкции из плавающего типа во вварной. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 91-96.
2. Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Voronkova M.N., Murygina L.V., Optimization of cutting conditions for the processing of bandages of rotary cement kilns at a special stand. World Applied Sciences Journal. 2014. T. 31. № 9. С. 1593-1600.
3. Гончаров М. С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Компьютерное моделирование контакта бандажа и ролика Сб. докл. Междунар.

научно-практической конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXI научные

чтения) / Белгор. гос. Технол. ун-т. (Белгород, 9-10 октября 2014г.). Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. С. 216-222.

Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Goncharov M.S.
CONTACT MANIFESTATION ERROR FORM AND LOCATION
IN TECHNOLOGICALS DRUMS

Considered the influence errors of form and position on the contact strength of the working surfaces of the support roller and bandage technological drum. Compiled simulation models that take into account influence on the contact patch of the location errors the roller associated with errors mounting or pliability base. Analyzed the patterns of change contact voltage at the various of error shape bandage. The calculations are performed in the environment of NX Advanced Simulation Advanced Simulation (Siemens PLM Software Inc.).

Key words: *roller carriages, bandage, axles, the contact strength, the contact patch, the shape and position errors.*

Шрубченко Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хуртасенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гончаров Михаил Сергеевич, аспирант кафедры технологии машиностроения.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: msgon@ya.ru