

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ В АНИЗОТРОПНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВТУЛКАХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Еремин Н.В.

научные руководители канд. техн. наук Докшанин С. Г., Трошин С. И.

Сибирский федеральный университет

В машинах и оборудовании, работа которых характеризуется небольшими рабочими скоростями и незначительной радиальной нагрузкой, находят применение подшипники скольжения, изготовленные из прессованной древесины и материалов на ее основе. Этот антифрикционный материал обладает хорошими демпфирующими способностями, неплохими триботехническими свойствами и несущей способностью. Кроме того, прессованная древесина может быть легко модифицирована для придания ей желаемых свойств, что позволяет в течение длительного времени эксплуатировать такие подшипники скольжения, обеспечивая низкий коэффициент трения в условиях ограниченной смазки.

Подшипники из прессованной древесины удовлетворительно работают в запыленном воздухе в условиях эксплуатации дорожных, строительных и сельскохозяйственных машин, в воде или сильно увлажненной среде, а также в условиях коррозионно-механического изнашивания в химически агрессивных средах машин и аппаратов пищевого производства.

Эксплуатационными условиями, ограничивающими применение втулок из прессованной древесины, являются предельно допустимые скорость скольжения $[v]$, контактное давление $[p]$ и рабочая температура $[t]$. Высокий срок службы подшипникового узла обеспечивается при условии, если предельная скорость $[v]$ не превышает 1 м/с, контактное давление $[p]$ не более 3–4 МПа, температура $[t]$ не превышает 70–80 °С.

Ограничения в эксплуатационных условиях работы таких подшипниковых узлов связаны с температурным режимом вследствие низкой теплопроводности древесины. Процесс трения между валом и втулкой приводит к увеличению температуры, что влечет за собой изменение физико-механических свойств материала, что приводит в дальнейшем к повышению коэффициента трения и интенсивности износа втулки. Таким образом, температура является одним из основных факторов, определяющих работоспособность подшипника скольжения, в котором используется втулка из прессованной древесины.

При выполнении работы была рассмотрена осесимметричная задача по определению контактного давления на поверхности цилиндрической втулки подшипника скольжения, запрессованной в металлическую обойму, при изменении температуры материала втулки и обоймы.

В качестве образца была взята втулка, изготовленная из прессованной древесины контурным прессованием марки ДП-К, плотность материала 1,2–1,35 г/см³, предел прочности при сжатии вдоль волокон 128 МПа, поперек волокон – 58 МПа. При изготовлении втулки сложным гнутьем получается деталь неодинаковой плотности материала вдоль радиуса, поэтому модуль упругости будет иметь зависимость как от плотности, так и от радиуса.

Подшипник скольжения вместе с обоймой представляют статически неопределенную систему, в которой при изменении температуры возникают напряжения и соответствующие им упругие деформации.

Составляем уравнение совместности деформации, которое имеет вид:

$$u_{\partial}^{ynp} + u_{\partial}^t = u_M^{ynp} + u_M^t, \quad (1)$$

где $u_{\partial}^{ynp}, u_M^{ynp}$ – перемещение по радиусу за счет упругой деформации внешнего волокна втулки и внутреннего материала обоймы соответственно; u_{∂}^t, u_M^t – перемещение за счет температурной деформации при условии равномерного нагрева внешнего волокна втулки и внутреннего материала обоймы соответственно.

Перемещения обоймы и втулки в радиальном направлении определяются по формуле:

$$u = \varepsilon_{\theta} r_3 \quad (2)$$

где ε_{θ} – относительная кольцевая деформация, r_3 – радиус контактной поверхности втулки и обоймы.

Известно, что модуль упругости древесины зависит от ее температурно-влажностного состояния и плотности. При изготовлении втулок сложным гнутьем с подпрессовкой изнутри или снаружи, получаем стенку втулки неодинаковой плотности вдоль ее радиуса. Модуль упругости материала втулки линейно зависит от плотности материала, поэтому он также будет зависеть и от радиуса втулки. На основе обобщенного закона Гука и равенства $\mu_{\theta r}/E_r = \mu_{r\theta}/E_{\theta}$, для материала втулки, относительная кольцевая деформация выражается зависимостью:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E_{\theta}} - \mu_{\theta r} \frac{\sigma_r}{E_r} = \frac{1}{E_{\theta}} (\sigma_{\theta} - \mu_{r\theta} \sigma_r), \quad (3)$$

где $\sigma_{\theta}, \sigma_r$ – кольцевое и радиальное напряжение соответственно; E_{θ}, E_r – модули упругости материала втулки в кольцевом и радиальном направлениях соответственно; $\mu_{\theta r}$ – коэффициент поперечной деформации.

Кольцевое напряжение, возникающее при нагреве втулки во внешнем волокне, с учетом формулы Ляме определяется следующим образом:

$$\sigma_{\theta} = \left[\frac{(1-c^{(\lambda_2-1)}) \lambda_1 \rho^{(\lambda_1-1)}}{c^{(\lambda_2-1)} (1-c^{(\lambda_1-\lambda_2)})} - \frac{(1-c^{(\lambda_1-1)}) \lambda_2 \rho^{(\lambda_2-1)}}{c^{(\lambda_1-1)} (c^{(\lambda_2-\lambda_1)} - 1)} + 1 \right] \frac{(\alpha_{\theta} - \alpha_r) \int_T E_{\theta} \delta T}{(1-\mu\nu)k^2 + \nu - 1} \quad (4)$$

Здесь $c = r_2/r_3$ – относительный геометрический размер втулки; r_1 – наружного радиуса слоя цилиндра; r_3 – радиус контактной поверхности втулки и обоймы; T – изменение температуры материала втулки и обоймы; $\alpha_{\theta}, \alpha_r$ – коэффициенты теплового расширения материала втулки в кольцевом и радиальном направлениях; $k = \sqrt{E_{\theta}/E_r}$ – коэффициент анизотропности материала втулки; μ – коэффициент поперечной деформации ($\mu = \mu_{r\theta}$); ρ – относительная координата.

Входящий в формулу (4) параметр λ зависит от физико-механических свойств материала втулки и определяется как:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\nu \pm \sqrt{\nu^2 + 4(1-\mu\nu)k^2}}{2},$$

где ν – эмпирический коэффициент, характеризующий изменение плотности материала втулки по радиусу.

Выражение для определения перемещений в радиальном направлении определим в соответствии с формулами (2) и (3), принимая $\sigma_r = 0$.

Для внутренней части обоймы выражения перемещений будут иметь вид:

$$u_m^{ynp} = p_k \frac{r_3}{E_m} \left(\frac{r_1^2 + r_3^2}{r_1^2 - r_3^2} + \mu_m \right); \quad (5)$$

$$u_m^t = \alpha_m T r_3. \quad (6)$$

Контактное давление p_k будет наружным для втулки и внутренним для обоймы (рис.1).

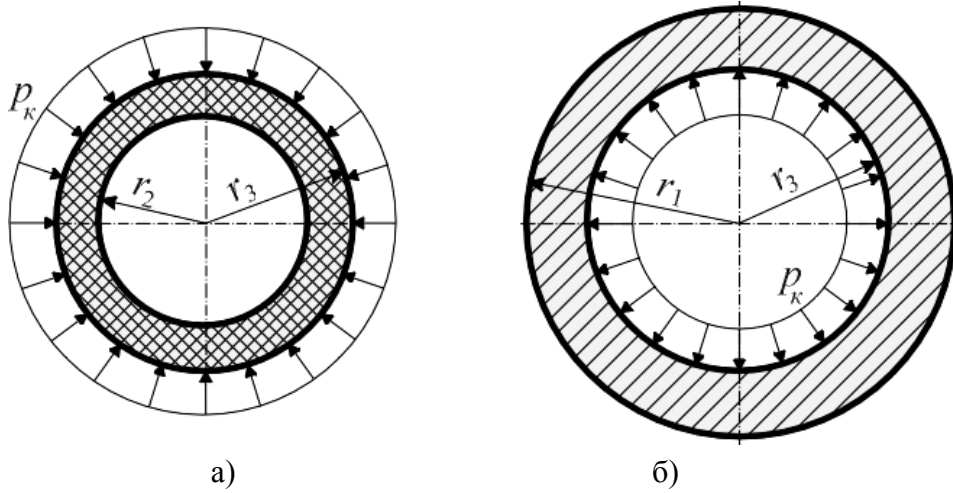


Рис.1 Распределение контактного давления в поперечном сечении: а) втулки; б) обоймы

Радиальные перемещения внешнего радиуса втулки будут определяться:

$$u_o^{ynp} = -\frac{p_k r_3}{E_0} \left[\left(\frac{\lambda_1}{1 - c^{(\lambda_1 - \lambda_2)}} - \frac{\lambda_2}{c^{(\lambda_2 - \lambda_1)} - 1} \right) - \mu_{r\theta} \right] \quad (7)$$

$$u_o^t = \frac{r_3}{E_0} \left[\frac{(1 - c^{(\lambda_2 - 1)}) \lambda_1 \rho^{(\lambda_1 - 1)}}{c^{(\lambda_2 - 1)} (1 - c^{(\lambda_1 - \lambda_2)})} - \frac{(1 - c^{(\lambda_1 - 1)}) \lambda_2 \rho^{(\lambda_2 - 1)}}{c^{(\lambda_1 - 1)} (c^{(\lambda_2 - \lambda_1)} - 1)} + 1 \right] \frac{(\alpha_\theta - \alpha_r) \int_T E_\theta \delta T}{(1 - \mu \nu) k^2 + \nu - 1} \nu \quad (8)$$

Подставив выражения (5), (6), (7) и (8) в уравнение (1), определяем контактное давление:

$$p_k = \frac{\frac{1}{E_0} \left[\frac{(1 - c^{(\lambda_2 - 1)}) \lambda_1}{c^{(\lambda_2 - 1)} (1 - c^{(\lambda_1 - \lambda_2)})} + \frac{(1 - c^{(\lambda_1 - 1)}) \lambda_2}{c^{(\lambda_1 - 1)} (c^{(\lambda_2 - \lambda_1)} - 1)} - 1 \right] \frac{(\alpha_\theta - \alpha_r) \int_T E_\theta \delta T}{(1 - \mu \nu) k^2 + \nu - 1} - \alpha_m T r_3}{\frac{1}{E_m} \left(\frac{r_1^2 + r_3^2}{r_1^2 - r_3^2} + \mu_m \right) + \frac{1}{E_0} \left[\frac{\lambda_1}{1 - c^{(\lambda_1 - \lambda_2)}} - \frac{\lambda_2}{c^{(\lambda_2 - \lambda_1)} - 1} \right] - \mu_{r\theta}} \quad (9)$$

Полученная формула для расчета контактного давления, возникающего при равномерном нагреве металлической обоймы с запрессованной в нее втулкой из анизотропного материала переменной плотности, может быть использована при выборе натяга, а также определения оптимального масляного зазора. Кроме того, данной формулой можно пользоваться для расчета прочности втулок, изготовленных из прессованной древесины методами продольного и торцового гнутья.