

УДК 621.79

Ищенко А. А.
Голинка С. Н.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ
ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Восстановление узлов прокатного оборудования, находящегося в тяжелых условиях эксплуатации металлургического производства, является актуальной задачей, решение которой в большинстве случаев определяет долговечность всей машины в целом. Однако существующие способы решения этой задачи не всегда отвечают современным требованиям и имеют такие недостатки как: невысокая эффективность и большая по времени длительность ремонта, что не всегда совместимо с требованиями непрерывных процессов прокатного производства. Поэтому представляется важной проблема поиска альтернативных и одновременно эффективных путей восстановления подшипниковых опор тяжело нагруженных металлургических машин, в частности, машин прокатного производства. Одним из таких путей является попытка решения проблемы за счёт применения современных ремонтных металлополимерных, композитных материалов, позволяющих решать такие задачи.

При моделировании фрагментов металлополимерных материалов важным этапом является определение перемещений, деформаций и напряжений в структурных элементах, воспринимающих нагрузки. Сложность решения этих задач в настоящее время требует применения экспериментальных и численных методов. Эффективность современных численных методов теории упругости и пластичности не устраняет необходимость применять и экспериментальные методы как при решении отдельных конкретных задач, так и для получения исходных данных и зависимостей для обоснования и проверки методов расчёта на прочность и жёсткость металлополимерных материалов в конструкциях.

Для определения максимального давления в подшипниковой опоре решается задача контактирования подшипника с поверхностью подшипникового узла. Задача о внутреннем контактировании под нагрузкой двух круговых цилиндров с малой разностью их радиусов кривизны была решена И. Я. Штаерманом [1] в предположении касания круга с круговым вырезом в бесконечной упругой плоскости. Это решение основывается на зависимости радиальных упругих перемещений от сосредоточенной силы для круга и для бесконечного упругого тела с круговым цилиндрическим вырезом, полученного С. П. Тимошенко.

В данной работе эта задача решается для схемы нагружения, при которой внешняя сила q приложена в центре поперечного сечения цилиндра. Данная схема более близка к реальной схеме в подшипниковом узле. Кроме того, здесь при выводе определяющих уравнений учитываются касательные напряжения $\tau_{r\varphi}$, возникающие в контакте трения.

В работе [2] контактную задачу для материала конечной толщины решают, задаваясь выражениями для перемещений u_r и u_φ . Подставляя их в уравнение равновесия и граничные условия, получим неопределённые параметры в выражении для перемещений.

В данной работе на основе работы [2] рассматривается инженерный метод расчёта распределения напряжений в подшипниковой опоре, восстановленной металлополимерным материалом. Основным недостатком этой методики является произвольный выбор функции перемещений, который может привести к значительным погрешностям в определении контактных параметров. Поэтому для подтверждения теоретических расчётов был проведен ряд экспериментов.

Исключая влияние трения между внешним кольцом подшипника и восстановленным подшипниковой опорой на закон распределения давления, рассмотрим подшипник качения,

загруженный только радиальными силами, равномерно распределёнными по длине интенсивностью q на погонную единицу. Допустим для расчётов, что подшипник и опора подшипника неподатливы, по сравнению с полимерным материалом. Однако, это предположение, как показали опыты и численные расчёты, являются недостаточно корректными. Поэтому при использовании данной методики в инженерных целях необходимо учитывать податливость подшипника и его опоры.

Целью данной работы является анализ нагружения опор подшипниковых узлов восстановленных при помощи металлополимерных материалов, разработка инженерной методики оценки напряженного состояния слоя металлополимерного материала, используемого при восстановлении подшипниковых опор, создание специального экспериментального оборудования с последующим исследованием свойств металлополимерных материалов, позволяющих применять данные материалы при ремонте металлургического оборудования.

На рис. 1 изображена расчётная схема перемещения подшипника на податливом полимерном материале.

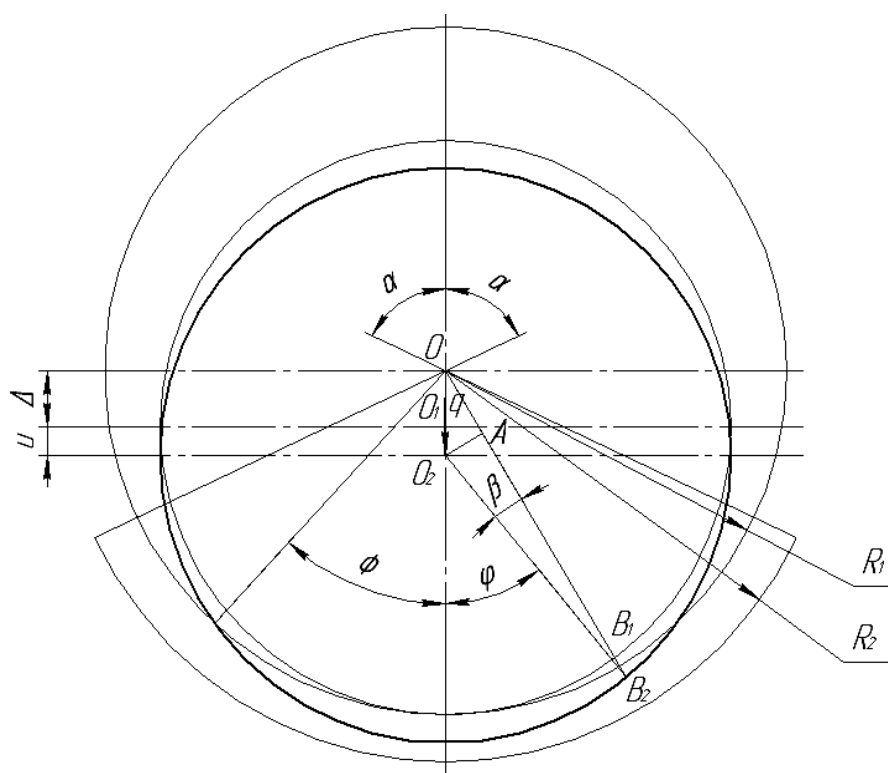


Рис. 1. Расчетная схема перемещения подшипника на податливом металлополимерном материале

При этом приняты следующие обозначения:

$d = 2r$ – наружный диаметр подшипника;

R_1 и R_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы уже полимеризованного материала;

$\Delta = R_1 - r$ – установочный радиальный зазор;

$u = u(\rho, \varphi)$ – радиальная деформация полимерного материала в произвольной точке (ρ – радиус-вектор точки; φ – полярный угол точки). Задача решается в полярных координатах;

$u_0 = u(R_1, 0)$ – осадка вала в направлении q ;

2φ – угол контакта нагруженного подшипника с материалом;

2α – угол материала между фиксирующими стопорными планками (если восстановление происходило без маячков, то $\alpha = \pi$);

O – центр цилиндрического отверстия подшипника;
 O_1 – центр окружности внешнего кольца ненагруженного подшипника;
 O_2 – центр окружности внешнего кольца подшипника после приложения нагрузки.
 Рассмотрим треугольник OO_2A , который представлен на рис. 1.

$$OA = OO_2 \cdot \cos(\varphi - \beta).$$

В силу малости угла β :

$$\cos(\varphi - \beta) \approx \cos \varphi.$$

Рассматривая задачу в полярных координатах с центром в точке O , будем иметь следующую зависимость:

$$R_1 + u(R_1, \varphi) - r = (\Delta + u_0) \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

Откуда при:

$$\begin{aligned} -\Phi &\leq \varphi \leq \Phi; \\ u(R_1, \varphi) &= u_0 \cdot \cos \varphi + \Delta \cdot \cos \varphi - (R_1 - r) \\ u(R_1, \varphi) &= u_0 \cdot \cos \varphi - \Delta \cdot (1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

Угол Φ можно определить из соотношения (2), подставляя вместо переменной φ значение Φ и зная условия:

$$\begin{aligned} u(R_1, \Phi) &= 0; \\ u_0 \cdot \cos \Phi - \Delta \cdot (1 - \cos \Phi) &= 0; \\ \Phi &= \arccos \frac{\Delta}{u_0 + \Delta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим теперь плоскую задачу в теории упругости в полярных координатах.

Упрощение заключается в том, что в этой задаче одну из координатных осей, например, Oz можно отбросить, и всё явление рассматривать как бы происходящим в одной плоскости Oxy для решения общей задачи математической формой решения.

Запишем следующие граничные условия, относящиеся к перемещениям и силам:

$$\begin{aligned} u(R_2, \varphi) &= 0; \\ u(\rho, \alpha) &= 0; \\ \sigma_\rho(R_1, \varphi)_{\Phi \leq |\varphi| \leq \alpha} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если подобрать непрерывную функцию u так, чтобы она удовлетворяла всем условиям системы, то получим точное решение задачи. В работе [2] приближённое решение, основанное на одном из вариационных методов. Авторы задаются функцией перемещений, служащей решением плоской задачи теории упругости и удовлетворяющей граничным условиям в виде:

$$u(\rho, \varphi) = [u_0 \cdot \cos \varphi - \Delta \cdot (1 - \cos \varphi)] \cdot \frac{\rho \cdot (R_2 - \rho)}{R_1 \cdot (R_2 - R_1)}. \quad (5)$$

Для плоско-напряженного состояния относительное радиальное и тангенциальное удлинения описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi) &= \frac{d}{d\rho} \cdot u(\rho, \varphi); \\ \varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi) &= \frac{u(\rho, \varphi)}{\rho}.\end{aligned}\quad (6)$$

По закону Гука для плоско-напряжённого состояния:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho}(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi) + \nu \cdot \varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi)] \\ \sigma_{\varphi}(\rho, \varphi) &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot [\varepsilon_{\varphi}(\rho, \varphi) + \nu \cdot \varepsilon_{\rho}(\rho, \varphi)]\end{aligned}\quad (7)$$

где E – модуль упругости металлополимерного материала; ν – коэффициент Пуассона или коэффициент поперечной деформации [3].

Записывая условие равновесия подшипника, получим формулу для расчёта погонной нагрузки на единицу ширины подшипникового узла:

$$q = -2 \cdot \int_0^{\Phi} \sigma_{\rho}(R_1, \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot R_1 d\varphi. \quad (8)$$

Данная методика может быть использована в инженерных расчётах, если требуется оценить напряжённое состояние восстановленной подшипниковой опоры при нагружении, зная значение деформации оси или вала в направлении действия силы.

Выполним расчёт по данному методу на конкретном примере, исходные данные для которого взяты такими, которые будут впоследствии заложены в характеристики экспериментальной установки.

Исходные данные:

$$\begin{aligned}r &= 15 \text{ мм}; R_1 = 15 \text{ мм}; R_2 = 17 \text{ мм}; \alpha = \frac{\pi}{2}; \Delta = R_1 - r; u_0 = 0,036 \text{ мм}; E = 13200 \text{ МПа}; \\ \nu &= 0,376.\end{aligned}$$

При этом угол контакта подшипника с металлополимерным материалом определяется по формуле (3).

На основании результатов расчётов с помощью математической программы MathCad построим график распределения давлений $\sigma_{\rho}(R_1, \varphi)$ и $\sigma_{\varphi}(R_1, \varphi)$ от Φ – угла контакта, представленный на рис. 2.

Найти силу, вызвавшую данные напряжения при заданной деформации, можно из формулы:

$$F = q_{\max} \cdot l, \quad (9)$$

где l – ширина подшипника.

Данная сила нам необходима для подтверждения предложенной инженерной методики расчёта и сравнения её с экспериментальными данными.

Исследования нагружения подшипниковой опоры выполнялись в лаборатории кафедры «Механического оборудования заводов черной металлургии» (МОЗЧМ) Приазовского государственного технического университета на специально спроектированной и изготовленной установке, позволяющей замерять одновременно деформацию металлополимерного материала, которым восстановлена подшипниковая опора и силу, вызвавшую эту деформацию.

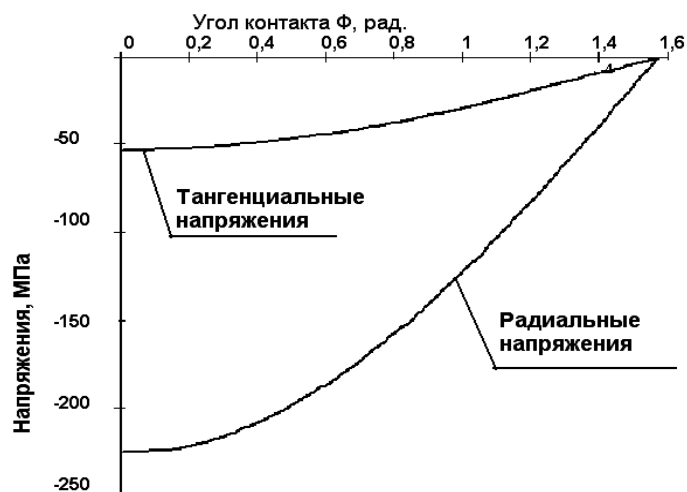


Рис. 2. Распределение напряжений в металлополимерном материале, при помощи которого была восстановлена опора под подшипником

Эта установка представлена на рис. 3. Установка состоит из основания 1, бойка 2, являющегося моделью наружного кольца подшипника, который центрируется в отверстии, проделанном в прижимной планке 3. Прижимная планка 3 центрируется штифтами 4, шпилькой 6 и прижимается с помощью гаек 7. В основании 1, которое является моделью восстановленной подшипниковой опоры, проделан паз, и заложен полимерный ремонтный материал 5 Multimetall Stahl 1018 фирмы «Диамант» (Германия). Для фиксации деформации в конструкцию установки был введен рычаг 10, ось качания которого 8 крепится на одной из сторон основания 1, а точкой контакта служит закреплённая на самом бойке 2 планка 9. Деформации фиксируются с помощью индикатора часового типа 11, который установлен на штативе 12 рядом с испытываемым образцом. Предел точности измерения индикатора часового типа с механизмом возврата равен 0,01 мм. Рычаг 10 позволяет увеличить точность измерения за счет разности плеч 1:6. Усилия создавались на прессе, позволяющем контролировать усилие, создаваемое на боек 2.

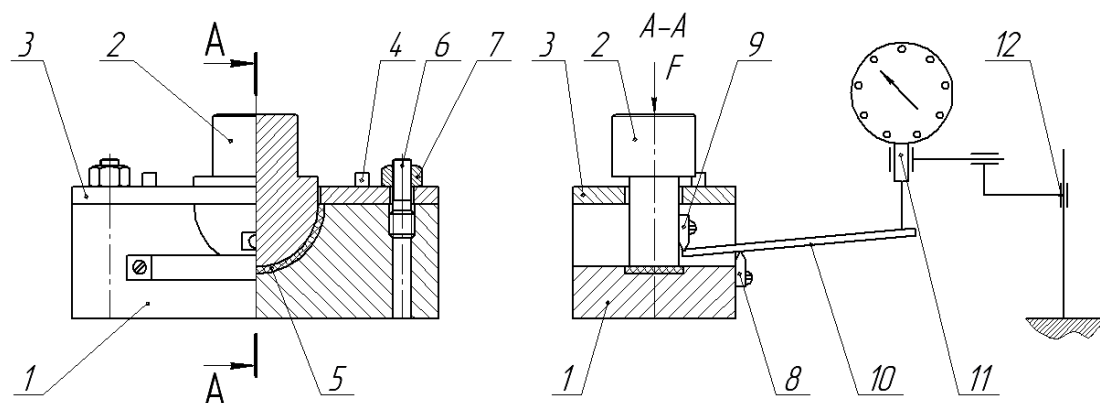


Рис. 3. Схема установки для одновременного замера деформации и силы, вызывающей эту деформацию

Также нужно отметить, что в серии экспериментов были изучены два способа восстановления опоры под подшипником. Первый способ заключался в свободном размещении слоя металлополимерного материала в восстановленной опоре, к которому можно применить данную методику, считая его состояние плосконапряженным. Второй способ моделирует объёмное напряженное состояние металлополимерного слоя, размещенного в кольцевой проточке восстановленной подшипниковой опоры.

Прежде чем определять деформации металлополимерного слоя под воздействием нагрузки, была определена конструктивная жёсткость самой установки, то есть величины деформации измерительной системы в процессе нагружения.

Результаты экспериментов в виде графиков представлены на рис. 4.

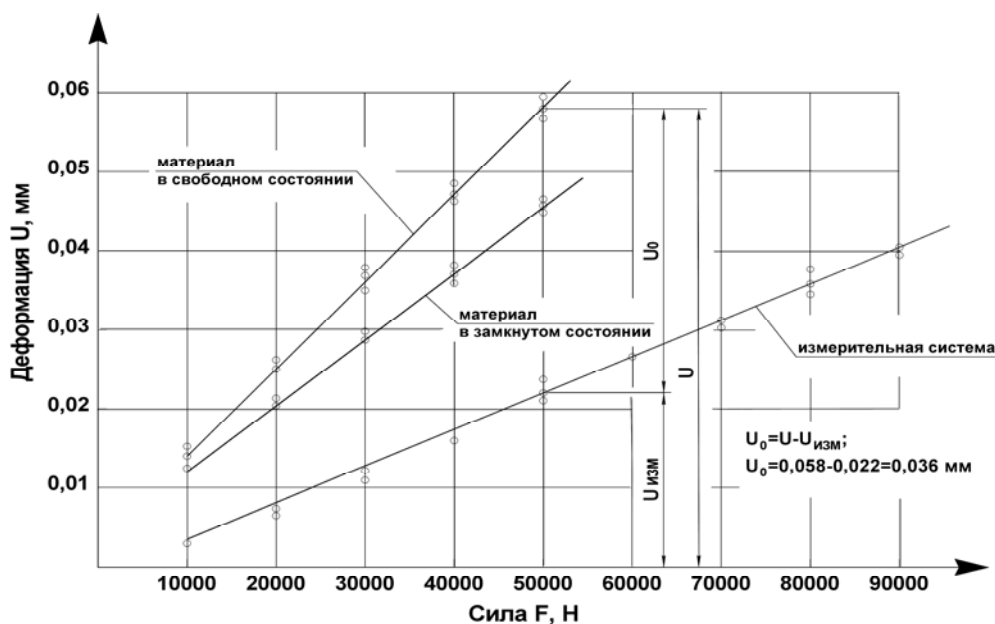


Рис. 4. График зависимости деформации от силы

Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными значениями, подсчитанными по предложенной методике, для таких же исходных данных показывает, что расхождение этих результатов не превышает 10 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработана инженерная методика, позволяющая выполнить оценку напряженного состояния слоя металлополимерного материала, при помощи которого восстановлена опорная поверхность подшипникового узла. Адекватность предложенной математической модели подтверждена экспериментально.

2. Анализ полученных результатов позволяет отметить, что деформация свободного слоя металлополимерного материала на 20–40 % больше, чем у слоя, расположенного в замкнутом объёме. Этот очень важный вывод позволяет использовать полученные данные в качестве основы для разработки технологии восстановления подшипниковых опор металлополимерными материалами с повышенной их несущей способностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штаерман И. Я. Контактная задача упругости / И. Я. Штаерман. – М. : Гостехтеориздат, 1949. – 295 с.
2. Детали машин и подъемно-транспортные машины. Т. 3. / Под ред. К. И. Заблонского. – К. : Техника, 1966. – 194 с.
3. Исследование механических характеристик металлополимерных материалов, применяемых при ремонтах металлургических машин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 4. – С. 107–110.

Ищенко А. А. – д-р техн. наук, проф. ПГТУ;

Голинка С. Н. – аспирант ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: 49@mail.ru sngluck@list.ru