

Исследования надёжности вкладышей шпиндельных устройств стана 1680 ЦХП-1

Г. P. Malyshev /Cand. Sci. (Tech.),
A. N. Grechanyy

Zaporozhye State Engineering Academy

Research reliability devices bearing spindle MILL 1680

Цель. Задача исследования заключается в получении математической модели процесса изнашивания и установления закона наработки до отказа, при помощи которого возможно было бы рассчитывать время начала ремонтных воздействий по замене вкладышей.

Методика. Для установления наработки до отказа и получения модели процесса изнашивания вкладышей шпиндельных устройств провели математическую обработку данных, полученных в ходе эксплуатации бронзовых вкладышей за период с 2008 по 2010 гг. на стане 1680.

Результаты. Рассмотрены факторы влияния бронзовых вкладышей на надёжность работы и долговечность шпиндельных устройств. На основании статистических данных получен закон распределения наработки до отказа. Даны рекомендации по времени работы в зоне аварийного износа вкладыша.

Научная новизна. Подтверждена применимость закона нормального распределения случайных величин для описания процесса изнашивания в ходе работы вкладышей шпиндельных устройств. Получено выражение для определения линейного (рабочего) износа вкладышей, а также выражение, описывающее возможное время работы в зоне аварийного износа.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель величины износа бронзовых вкладышей стана 1680 позволит прогнозировать техническое состояние вкладышей на протяжении всего времени эксплуатации. (Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.)

Ключевые слова: шпиндель, вкладыш, износ, закон распределения случайных величин.

Постановка проблемы. Практика эксплуатации универсальных шпинделей в приводах прокатных станов свидетельствует о недолговечности вкладышей шарниров скольжения. Основной причиной частых периодических поломок (или аварийных отказов) шпиндельных соединений является повышенный зазор в шарнире из-за износа бронзовых вкладышей [1].

Из-за несовершенства большинства применяемых конструкций уравнивающих устройств (пружинных, гидравлических, с противовесом) необходимые условия в основном обеспечиваются только при монтаже шпинделей и валковых муфт. Угловые зазоры, в зависимости от упруго-массовых параметров механической системы и характера прикладываемой нагрузки, могут приводить к значительным динамическим нагрузкам в линиях привода и аварийным поломкам, как самих шпинделей, так и другого оборудования клетей (хвостовики рабочих валков, шестеренные валы, муфты, редукторы) [1].

Исследования, проведенные на кафедре МОЗЧМ ДонНТУ [1], показали, что основной причиной малого срока службы вкладышей яв-

ляются недостатки традиционной конструкции шпинделя с сухарем:

- наличие эксцентриситета между геометрическими осями валка и шпинделя, обуславливающего развитие центробежной силы инерции, которая приводит к разнотолщинности полос;
- нарушение кинематики соединения из-за зазоров в шарнире и перераспределение нагрузок на контактных поверхностях (передача части крутящего момента за счет сухаря, работа вкладыша на изгиб, его излом).

Цель. Вариантом решения проблемы износоустойчивости вкладышей шпинделей является не только разработка новой конструкции вкладышей и сопрягающего узла, снижающих биение головок и валковых муфт, но и выполнение своевременных ремонтов существующих конструкций. Задача исследования заключается в получении математической модели процесса изнашивания и установлении закона наработки до отказа, при помощи которого возможно было бы рассчитывать время начала ремонтных воздействий по замене вкладышей. С этой целью провели математическую обработку данных, полученных в ходе эксплуатации бронзовых вклады-

Результаты расчетов показателей надёжности за 2008–2010 гг.

Интервал времени, сутки	t_i	$n_{\Delta t}$	$f_i = \frac{n_{\Delta t}}{n}$	$F_i = \sum f_i = \sum f_i \cdot \Delta t$	P_i	$f(t)_{расч}$
3	1,5	0	0	0	1,0000	0
6	4,5	0	0	0	1,0000	0
9	7,5	0	0	0	1,0000	0
12	10,5	0	0	0	1,0000	0
15	13,5	0	0	0	1,0000	0
18	16,5	0	0	0	1,0000	0
21	19,5	1	0,0278	0,0278	0,9722	0,009259
24	22,5	1	0,0278	0,0556	0,9444	0,009259
27	25,5	7	0,1944	0,2500	0,7500	0,064815
30	28,5	9	0,2500	0,5000	0,5000	0,083333
33	31,5	8	0,2222	0,7222	0,2778	0,074074
36	34,5	5	0,1389	0,8611	0,1389	0,046296
39	37,5	3	0,0833	0,9444	0,0556	0,027778
42	40,5	2	0,0556	1,0000	0,0000	0,018519

шей за период с 2008 по 2010 гг. на стане 1680 ЦХП-1 ПАО «Запорожсталь».

Методика исследований. На основании статистических данных, полученных в ходе эксплуатации бронзовых вкладышей за период с 2008 по 2010 гг. определяем расчетную плотность вероятности отказов как [2]:

$$f(t)_{расч} = \frac{n_{\Delta t}}{n \cdot \Delta t}, \quad (1)$$

где $n_{\Delta t}$ – количество замен вкладышей в интервале времени; n – общее количество замен за три года; Δt – расчетный интервал времени.

Вероятность отказов рассчитываем по формуле:

$$F_i = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \Delta t \quad (2)$$

и вероятности безотказной работы:

$$P_i = 1 - F_i. \quad (3)$$

Данные о времени эксплуатации вкладышей, а также значения показателей надёжности, определенные по формулам (1)–(3), приведены в табл. 1, где также в расчетном интервале времени указано количество проведенных замен.

Графическое распределение этих величин приведено на рис. 1 и 2.

Визуальный анализ графика показывает, что с большей долей вероятности отказы могут быть описаны законом нормального распределения, который характерен для постепенных отказов, вызванных износом и старением [3], но т. к. работа шпинделей сопряжена с ударными нагрузками, возникает необходимость подтверждения применения именно закона нормального распределения, а не закона Вейбулла, который хорошо описывает отказы усталостные, возникающие в результате совместного воздействия износа и ударных нагрузок [3].

При расчете по закону нормального распределения установлено, что плотность распределения подчиняется зависимости [3]:

$$f(t) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{4,8\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t_i - 31)^2}{2 \cdot 4,8^2}}, \quad (4)$$

где A – нормируемый множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой распределения равна единице; t_i – текущее значение времени; t_0 – математическое ожидание наработки до отказа (времени безотказной работы), принимается равным средней наработке до отказа [3]; σ – среднеквадратичное отклонение случайной величины.

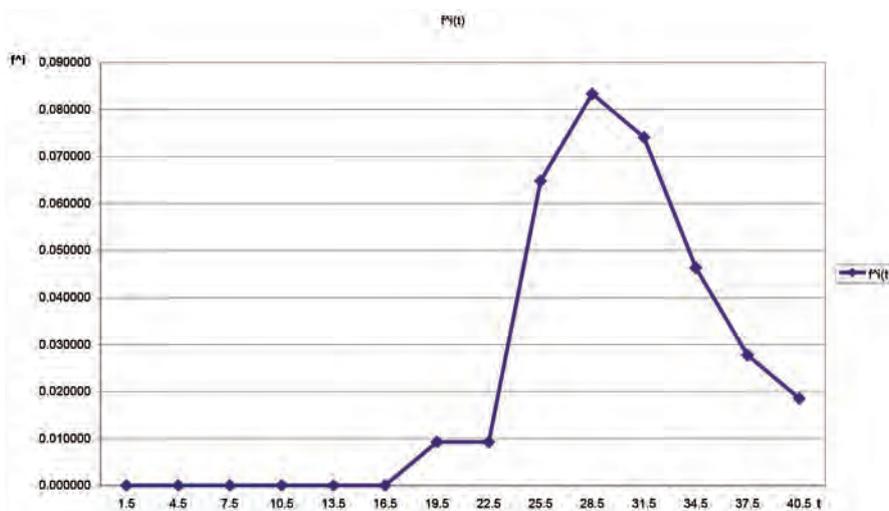


Рис. 1. График зависимости расчетной плотности вероятности отказов от времени эксплуатации вкладышей $f_i^{\wedge}(t)$

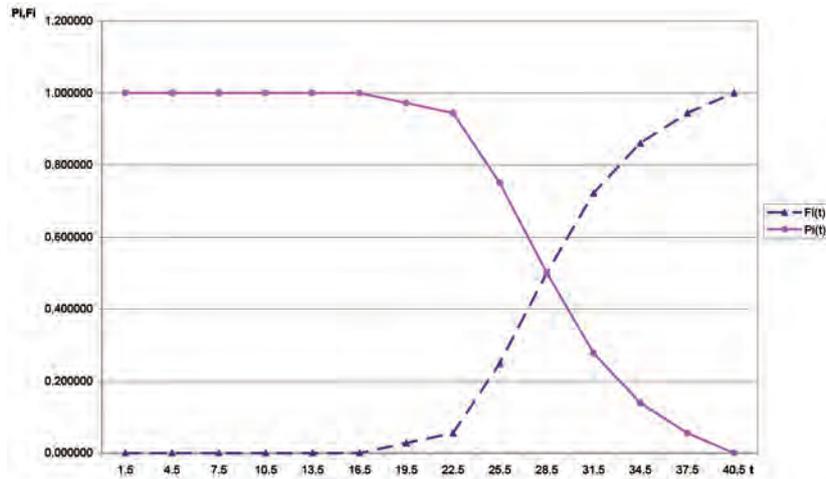


Рис. 2. График изменения вероятности безотказной работы (P_i) и вероятности отказов (F_i) во времени

Абсолютную величину возможных отклонений для принятой доверительной вероятности $\beta=0,8$ и среднего времени наработки до отказа $t = t_0=31$ суток определяем из выражения [2]:

$$\varepsilon_\beta = \bar{\sigma}_{t_0} \cdot \arg \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right) \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{t_0}$ – среднеквадратичное отклонение оценки величины t_0 ;

$$\bar{\sigma}_{t_0} = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}^2}{n}} = \sqrt{\frac{23}{36}} = 0,7993 \text{ суток} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{23} = 4,7958 \text{ суток} \quad (7)$$

$$\varepsilon_\beta = 0,7993 \cdot 1,282 = 1,025 \text{ суток,}$$

где $\arg \Phi^*(x)$ – функция обратная функции Лапласа.

Значения $f(t)$ для всех интервалов приведены в табл. 1.

Доверительные интервалы наработки до отказа: $t_{он}, t_{об}$

$$t_{он} = t_0 - \varepsilon_\beta = 31 - 1,025 = 29,975 \text{ суток.} \quad (8)$$

$$t_{об} = t_0 + \varepsilon_\beta = 31 + 1,025 = 32,025 \text{ суток.} \quad (9)$$

Полученные данные хорошо коррелируются с данными, приведенными в работе [4].

Распределения плотности вероятности отказов по закону Вейбулла определяем из выражения [2]:

$$f(t) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right] \quad (10)$$

где a – параметр масштаба, b – параметр формы.

Таким образом, получили выражение:

$$f(t) = \frac{5,93}{33,54} \cdot \left(\frac{t}{33,54} \right)^{4,93} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{33,54} \right)^{5,93} \right]$$

Полученные данные по статистическим и теоретическим плотностям вероятности отказов,

по которым построены графики распределения плотности вероятности отказов для различных законов распределения случайных величин (рис. 2), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические и теоретические значения плотности распределения наработки до отказа

Наработка до отказа, суток	Плотность вероятности распределения		
	$f(t)_{расч}$	$f(t)_{норм}$	$f(t)_{Вейб}$
1,5	0	6,26754E-10	3,8963E-08
4,5	0	2,36409E-08	8,79821E-06
7,5	0	6,02978E-07	0,000109337
10,5	0	1,03994E-05	0,000574469
13,5	0	0,00012128	0,001977787
16,5	0	0,000956397	0,005267646
19,5	0,009259	0,005099863	0,011710731
22,5	0,009259	0,018388625	0,022485595
25,5	0,064815	0,044834324	0,037607124
28,5	0,083333	0,073916707	0,054161716
31,5	0,074074	0,082403416	0,06517028
34,5	0,046296	0,06211814	0,062330958
37,5	0,027778	0,031663746	0,044114982
40,5	0,018519	0,010913819	0,020986196

Сравнение графиков (рис. 3) показывает, что действительно преобладает закон нормального распределения.

Известно [2], что диаграмма изнашивания имеет три основные зоны:

- приработочного износа;
- рабочего износа;
- аварийного износа.

Согласно рекомендациям Д. П. Волкова, в общем случае зависимость износа детали, как случайной функции наработки, может быть представлена в виде [5]:

$$U(t) = a_i \cdot t^b + b_i, \quad (11)$$

где a_i – случайная величина, зависящая от свойств поверхностей деталей, условий работы

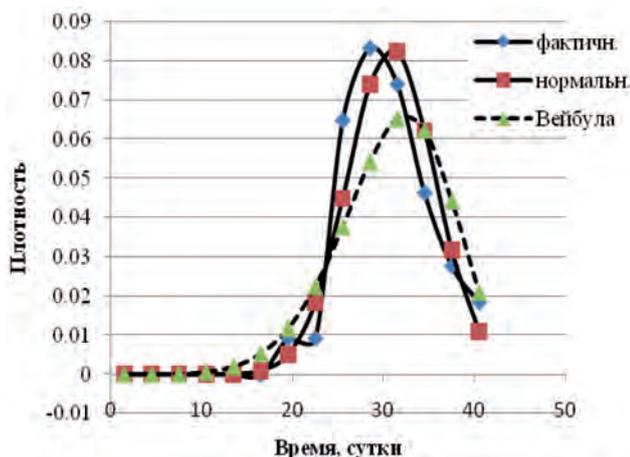


Рис. 3. Графики распределения плотности вероятности отказов для различных законов распределения случайных величин

и т. д.; t – время функционирования; β – коэффициент уравнения динамики износа (детерминированная величина для определенного вида сопряжения) [5]; b_i – величина износа детали по окончании приработки.

Таким образом, выполнив преобразование формулы (11), приняв для износа посадочных гнезд корпусных деталей $\beta=1$ [5] и величину износа вкладыша по окончании приработки, равную 0,095 кг, получим выражение для определения линейного (рабочего) износа вкладышей:

$$U = 0,0018 \cdot t + 0,095 \quad (12)$$

где U – величина износа, кг.

Согласно статистическим данным зона рабочего износа ограничена 700 часами, после чего начинается аварийное изнашивание, на основании этого строим графическую зависимость линейного (рабочего) износа вкладышей от времени эксплуатации (рис. 4).

Исследовали зону аварийного износа, имеющего нелинейный характер (рис. 5). При этом учитывали, что предельная величина износа вкладыша до поломки составляет 1,5 кг, а среднее время наработки вкладыша до поломки –

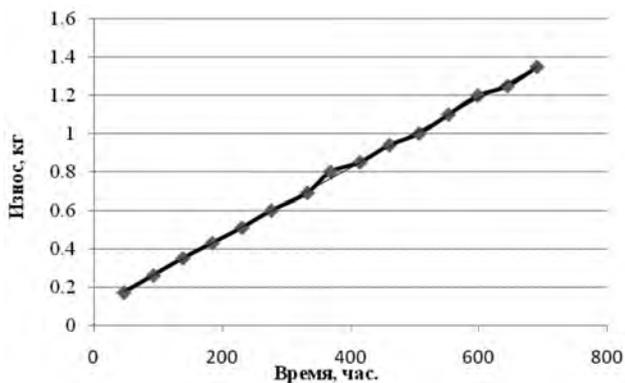


Рис. 4. График зависимости износа в рабочей зоне

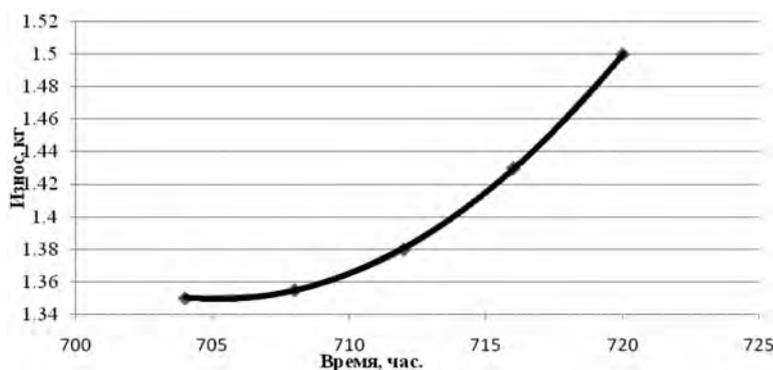


Рис. 5. График зависимости величины износа во времени в зоне аварийного изнашивания

720 часов. Получена зависимость величины износа в интервале времени 700–720 часов, имеющая вид:

$$U = 0,0007 \cdot t^2 - 0,976 \cdot t + 341,555 \quad (13)$$

при коэффициенте $R = 0,9999$.

Выводы

1. Разработана математическая модель величины износа бронзовых вкладышей стана 1680, которая позволяет прогнозировать их техническое состояние на протяжении всего времени эксплуатации.

2. Исследована зона аварийного износа и показано, что в этой зоне использование вкладышей возможно на протяжении не более 20 часов.

Библиографический список / References

1. Руденко В. И. Обоснование рационального выбора конструкции шпиндельного соединения / В. И. Руденко, Е. В. Ошовская, Н. В. Нижник // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2006. – № 1. – С. 28–32.

Rudenko V. I., Oshovskaya E. V., Nizhnik N. V. *Obosnovanie ratsionalnogo vyibora konstruktсии shpindel'nogo soedineniya*. Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie. 2006, no. 1, pp. 28-32.

2. Жук А. Я. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование: монография / А. Я. Жук, Г. П. Малышев, Н. К. Желябина, О. М. Клевцов. – Запорожье: Издательство государственной инженерной академии, 2008. – 500 с.

Zhuk A. Ya., Malyishev G. P., Zhelyabina N. K., Klevtsov O. M. *Tekhnicheskaya diagnostika. Kontrol i prognozirovanie*. – Zaporozhe, Izdatelstvo gosudarstvennoy inzhenernoy akademii, 2008. 500 p.

3. Плахтин В. Д. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин / В. Д. Плахтин. – М.: Металлургия, 1983. – 415 с.

Plahthin V. D. *Nadezhnost, remont i montazh metallurgicheskikh mashin*. Moscow, Metallurgiya, 1983. 415 p.

4. Веренев В. В. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680: монография / В. В. Веренев, В. И. Большаков, А. Ю. Путники, А. Г. Маншилин, С. В. Мацко. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 184 с.

Verenev V. V., Bolshakov V. I., Putniki A. Yu., Manshilin A. G., Matsko S. V. *Dinamicheskie protsessyi v kletyah shirokopolosnogo stana 1680*. Dnepropetrovsk, IMA-press, 2011. 184 p.

5. Волков Д. П. Надежность строительных машин и оборудования: учеб. пособие для студентов вузов / Д. П. Волков, С. Н. Николаев. – М.: Высш. Школа, 1979. – 400 с.

Volkov D. P., Nikolaev S. N. *Nadezhnost stroitelnykh mashin i oborudovaniya*. Moscow, Vyssh. Shkola, 1979. 400 p.

Purpose. The objective of the study is to obtain a mathematical model of wear process and the establishment of the law time to failure, by means of which it would be possible to calculate the start time of the repair actions to replace liners.

Methodology. To establish the time to failure and provide a model of the process of bushings liners spindle units conducted a mathematical processing of the data obtained during the operation of bronze bushings for the period from 2008 to 2010 the mill in 1680.

Findings. The factors influence bronze bushings on the reliability and service life of the spindle device. On the basis of statistical data obtained distribution law time to failure. Recommendations are given for the time of work in the area of disaster liner bushings.

Originality. Affirming the applicability of the law of normal distribution of random variables to describe the bushings process in progress inserts spindle devices. An expression for determining the linear (working) bushings pads, as well as an expression describing the best time to wear the emergency zone.

Practical value. Elaborate mathematical model of the bushings of bronze mill liners 1680, will predict technical condition of liners throughout the operating time.

Key words: spindle, bushings, the law of distribution of random variables.

Поступила 29.01.2016

