

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ БАЗ

Л. В. ЕФРЕМОВ, А. В. ТИКАЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Рассматривается эффективный вариант измерения износов деталей машин и приборов в полевых условиях методом искусственных баз на основе применения цифровых микроскопов и различных средств образования лунок. Подробно описываются способы образования лунок и расчета их параметров. Разработана методика оценки износов с использованием микроскопа "Digimicroprof". Для расчета глубины лунок, а также для прогнозирования остаточного ресурса составлена специальная программа в редакторе MathCad для всех вариантов лунок.

Ключевые слова: цифровой микроскоп, износ, лунка, измерение

Важнейшим этапом технического обслуживания при эксплуатации машин и приборов является контроль степени изнашивания их основных узлов и деталей, таких, например, как подшипники скольжения. Среди способов изучения этого деградационного процесса особое место занимает метод искусственных баз (МИБ) [1].

Целесообразность написания данной статьи, посвященной, в общем, хорошо известному методу, обусловлена появлением на рынке оригинальных цифровых микроскопов, которые отличаются не только малыми размерами и массой, а также низкой стоимостью (от 2000 до 5500 руб.), но и возможностью производить съемку с увеличением до 300 крат и осуществлять обработку формируемых изображений непосредственно на мониторе компьютера с помощью специального программного обеспечения. В сочетании с различными способами создания искусственных баз использование цифровых микроскопов позволяет расширить область применения МИБ в полевых условиях (например, на судне) за счет оперативного контроля износа узлов машины.

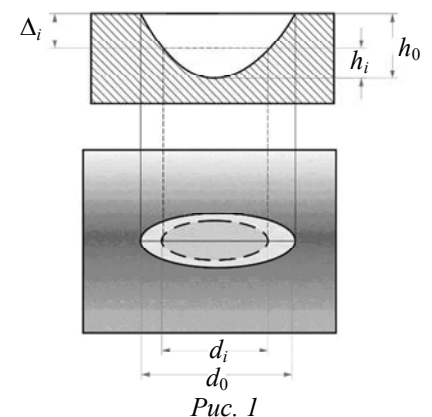
Суть метода искусственных баз заключается в нанесении на поверхность трения углубления правильной формы по оси, расположенной по нормали к трущейся поверхности (рис. 1). Это искусственное углубление называется лункой, а ее глубина обозначается параметром h . Величина h рассчитывается по видимому на поверхности трения геометрическому размеру d лунки с учетом некоторого фактора K с помощью функции $H(K, d)$, зависящей от способа образования лунки. Размер d обозначим термином „входной параметр“.

По мере изнашивания детали входной параметр d_i и глубина h_i будут уменьшаться при каждом i -м измерении после наработки t_i (между моментами T_0 и T_i). Это позволяет оценивать износ поверхности Δ_i за время t_i по следующим формулам (в соответствии со схемой на рис. 1):

$$\Delta_i = h_0 - h_i = H(K, d_0) - H(K, d_i); \quad (1)$$

$$t_i = T_i - T_0, \quad (2)$$

где d_0 — входной параметр в начале испытаний в момент T_0 .



Для обоснования предлагаемого варианта применения МИБ в полевых условиях рассмотрим способы образования лунок и характеристики микроскопов для измерения входного параметра.

Известны различные способы образования лунок:

- вдавливание (или удар) индентора, имеющего вид шара, пирамиды или конуса, в поверхность детали;
- вырезание лунки вращающимся резцом или высверливание специально заточенным резцом;
- выскабливание или вышлифовывание лунки диском и другими инструментами.

Схема образования лунки с помощью шара диаметром $D = 10$ мм показана на рис. 2, а. Отпечаток получается путем вдавливания шарика прибором (например, твердомером марки ТН600), предназначенным для испытаний на твердость по Бринеллю. Тогда формула для оценки глубины лунки при i -м измерении будет соответствовать приведенной схеме и функции $H(K,d)$ при $K = D$:

$$h_i = \left(D - \sqrt{D^2 - d_i^2} \right) / 2 = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_i}{D} \right)^2} \right). \tag{3}$$

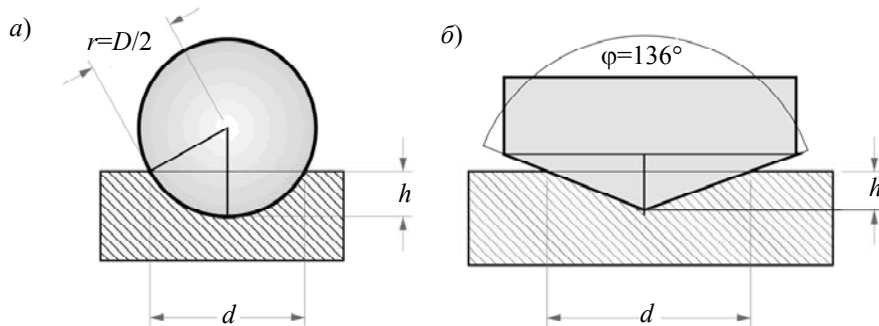


Рис. 2

Второй вариант формирования отпечатка показан на рис. 2, б. В этом случае лунка пирамидальной формы образуется с помощью алмазного инструмента с квадратным основанием и углом $\varphi = 136^\circ$ при вершине между противоположающимися гранями. Глубина рассчитывается по длине диагонали d_i и формуле

$$h_i = \frac{d_i}{2} \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi}{2} \right). \tag{4}$$

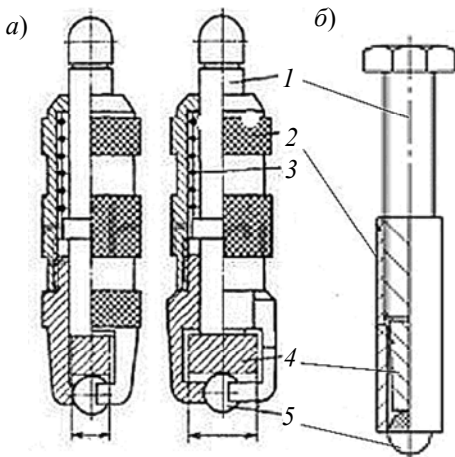


Рис. 3

При $K = \varphi = 136^\circ$ получаем $h_i = \frac{d_i}{2} \operatorname{ctg} \left(\frac{136^\circ}{2} \right) = 0,202d_i$.

С целью создания указанных отпечатков ударным воздействием в полевых условиях целесообразно использовать переносной твердомер металлов „Польди-Хютте“ [2] либо специально изготовленное подобное ударное приспособление: см. рис. 3, а, б соответственно, где 1 — боек, 2 — корпус державки, 3 — спиральная пружина, 4 — эталонный брусок (мера твердости) или прокладка, 5 — шариковый индентор 10 мм.

Самый популярный МИБ — метод вырезания лунок (МВЛ), который принято считать наиболее точным. Эта процедура выполняется по ГОСТ 27860-88 прибором УПОИ-6 и по ГОСТ 23.301-78.

Вырезание лунки производят с помощью алмазного резца, вращающегося вокруг оси по радиусу $r = 11$ мм. Резец периодически подводят к поверхности трения детали (образца) при подаче 0,002—0,003 мм/об, наблюдая процесс вырезания с помощью микроскопа прибора УПОИ-6. В результате прохода резца образуется лунка длиной l (рекомендуется от 1,5 до 4 мм), при достижении которой производится доводка поверхности лунки. Глубина лунки для плоских и цилиндрических поверхностей (при расположении лунки вдоль образующей цилиндра) вычисляется по формуле, которая соответствует функции $H(K, d)$ при $r = K$ и $l = d$:

$$h_i = \frac{l_i^2}{8r}. \quad (5)$$

При малых значениях отношения $l_i/2r$ формула (5) выводится из выражения (3) путем ее разложения в ряд Тейлора (Маклорена) с учетом того, что $r = D/2$ и $l = d$.

При измерении диаметра лунки по вогнутой окружности цилиндра формула (5) принимает следующий вид:

$$h_i = \frac{l_i^2}{8} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right). \quad (6)$$

После каждого i -го измерения длины l_i при наработке t_i износ Δ_i детали следует рассчитывать по формуле (1).

Можно отметить два явных преимущества метода вырезания лунок по сравнению с первым рассмотренным способом (вдавливанием индентора): во-первых, удается избежать наплыва материала детали на края отпечатка и выполнения их зачистки, а, во-вторых, удлиненная форма лунки позволяет более точно измерять входной параметр d , т.е. $d_i = l_i$. Вместе с тем это более трудоемкий и дорогой метод, что следует из описания требований к изготовлению прибора и способу нарезания лунки.

Измерение размеров лунок на плоских, сферических и цилиндрических поверхностях можно производить с помощью микроскопов для определения твердости по методу Бринелля. Наиболее подходящим для измерения отпечатка, образуемого на поверхности различных металлов, является микроскоп типа МПБ-2, который входит в комплект поставки твердомера „Польди-Хютте“. В еще большей мере требованиям к оперативным измерениям по методу искусственных баз в полевых условиях соответствует цифровой микроскоп “Digmicroprof” (рис. 4, а).

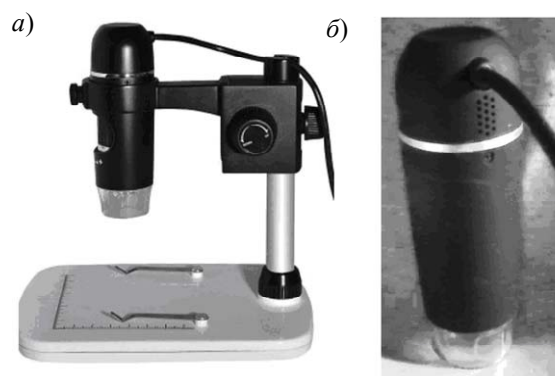


Рис. 4

Этот микроскоп оснащен камерой 5.0 MegaPixel, позволяющей получать снимки высокого качества, что обеспечивает точную оценку размеров лунок при увеличении 20...300 крат непосредственно на мониторе ПК. Микроскоп не только по массогабаритным характеристикам удовлетворяет условиям измерений в полевых условиях, но и оснащен таким ПО, которое позволяет производить фото- и видеосъемку с высоким разрешением. Кроме того, установка веб-камеры непосредственно на исследуемую поверхность (рис. 4, б) обеспечивает возможность измерения лунок без использования штатива.

Для оперативного использования микроскопа “Digimicroprof” в полевых условиях необходимо было решить следующие задачи:

- разработка методики съемки и калибровка изображений (рис. 5, а, б);
- выбор вида лунок и соответствующих инструментов, пригодных для образования и измерения износов;
- создание программного обеспечения для обработки результатов измерений.

Программа, заложенная в приборе, позволяет измерять не только линейные размеры, но и радиусы, и даже углы. При измерении, например, круглых лунок возможно определить их диаметр и площадь отпечатка непосредственно на поверхности детали (рис. 5, в). Благодаря направленному излучению светодиодов изображение лунки получается достаточно резким и четким, что позволяет обеспечить приемлемую точность измерений.

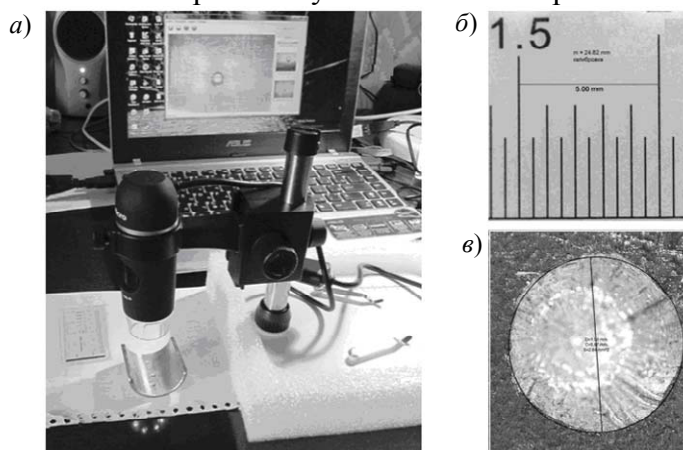


Рис. 5

Использование микроскопа “Digimicroprof” позволяет расширить применение МИБ в полевых условиях. Для обоснования этого были проведены специальные испытания по определению эффективности способов образования лунок, а также по выбору инструментов.

Способ 1. Ударное вдавливание шарика (см. рис. 2, а) с помощью приспособления, показанного на рис. 3, б и 6, а. Расчет величин h_i и Δ_i выполняется по формулам (3) и (1).

Способ 2. Высверливание круглой лунки сверлом 4 мм по металлу с углом режущих кромок 118° (рис. 6, б). Согласно расчету по формуле (4) $h_i = 0,3d_i$.

Способ 3. Выскабливание лунки сверлом 10 мм для керамики (см. рис. 6, в). Данное сверло отличается высоким коэффициентом корреляции, составляющим 0,997. Тогда формула для измерения глубины лунки имеет следующий вид:

$$h_i = 0,491d_i^{1,083} \approx 0,52d_i. \quad (7)$$

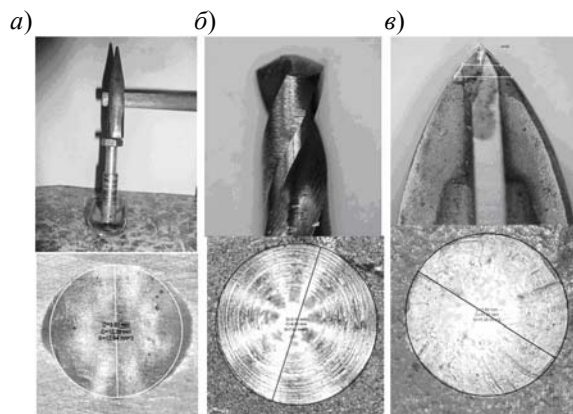


Рис. 6

Способы 4 и 5 были специально разработаны для лунок, образованных с помощью дрели для гравировки или мини-дрели с гибким валом (рис. 7, а, б).

Способ 4. Вырезание круглой лунки насадкой с шаровым сверлом или шарошкой (рис. 7, б). Для оценки глубины и износа применяются формулы (3) и (1).

Способ 5. Формирование углубления в виде надреза с радиусом сегмента 10, 12 или 16 мм с помощью отрезного диска соответствующего диаметра (рис. 7, в). Образованная таким путем лунка имеет удлиненную форму, подобную лунке, полученной по ГОСТ 27860-88. Расчет глубины и износа выполняется по формулам (5), (6) и (1).

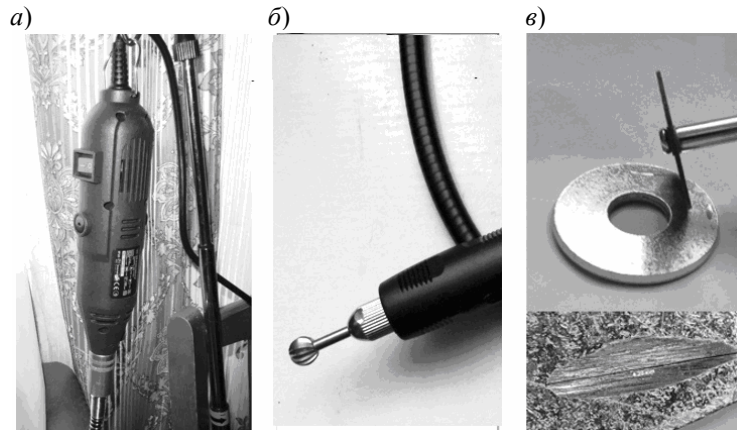


Рис. 7

Для нарезания лунок были испытаны и другие, кроме названных, инструменты, такие как шарошки и фрезы по металлу с фигурным верхом. Исследованы различные способы их использования в качестве ударных инденторов или режущих инструментов при вращении. Решающим фактором при выборе инструментов для образования лунок является учет диапазона износов поверхности.

Выбор способа образования лунок зависит от ряда факторов. Прежде всего, нельзя допускать ослабления прочности исследуемых деталей. Так, недопустимо на шейках коленчатого вала делать надрезы методом вырезания лунок или с помощью отрезного диска (способ 5). Здесь больше подходит способ вдавливания или выскабливания инструментом шаровой формы, который не создает концентраций напряжений. Для поверхностей трения, не подверженных значительным деформациям, пригодны все способы, но с учетом соотношения твердости инструмента и поверхности трения. Для случая „неудобного“ расположения лунок исследован способ получения отпечатков с помощью пластилина: такой прием, однако, позволяет достаточно точно измерить диаметр лунки, но не ее глубину. Особо следует отметить качественное изображение круглых лунок при всех способах их образования (см. рис. 6).

Для расчета глубины лунки h по входному параметру d , а также для прогнозирования остаточного ресурса узла составлена специальная программа в редакторе MathCad для всех вариантов лунок на основе работ [3, 4]. Результаты расчета максимального размера глубины лунки в зависимости от входного параметра d приведены в таблице.

Инструмент	Глубина лунки, мм, при d , мм				
	1	2	3	4	5
Шар $D=10$ мм	0,0251	0,101	0,2303	0,4174	0,6699
Фреза $D=7,8$ мм	0,0322	0,1304	0,3	0,5519	0,9067
Шарошка 6 мм	0,042	0,1716	0,4019	0,7639	1,3417
Диск $r=12$ мм	0,0104	0,0417	0,0941	0,1678	0,2633
Диск $r=16$ мм	0,0078	0,0313	0,0705	0,1255	0,1965
Сверло при $\varphi=118^\circ$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Шарошка $\varphi=100^\circ$	0,4195	0,8391	1,2586	1,6782	2,0977
Сверло 10 мм по керамике	0,491	1,0402	1,6136	2,2035	2,8059
Фреза $\varphi=60^\circ$	0,866	1,7321	2,5981	3,4641	4,3301

Для внедрения предложенной методики необходимо, во-первых, использовать инструкцию для МИБ; во-вторых, подготовить квалифицированных специалистов по применению рассмотренных методов; в-третьих, скомпоновать мобильный набор инструментов и аппаратуры для оперативного контроля износов при техническом обслуживании и ремонте машин и приборов.

Внедрение методики в практику позволит более успешно решать проблемы триботехники не только в лабораторных условиях, но и при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущев М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
2. Твердомер металлов Польди-Хютте (паспорт и руководство по эксплуатации) [Электронный ресурс]: <<http://vostok-7.ru/>>.
3. Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб: Наука, 2008.
4. Ефремов Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. СПб: Изд-во „Нестор-История“, 2011.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: levleft@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Рекомендована кафедрой
машиноведения и основ конструирования

Поступила в редакцию
07.12.15 г.

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Измерение износов деталей машин в полевых условиях на основе метода искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 237—242.

MEASUREMENT OF MACHINE PART WEAR IN FIELD CONDITIONS WITH THE USE OF ARTIFICIAL BASE METHOD

L. V. Efremov, A. V. Tikalov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: tikalov2010@mail.ru

An effective artificial base method for measuring machine part wear in field conditions with the use of digital microscopes and various means for notch formation is considered. Methods of notch formation and evaluation of their parameters are described in details. A method of wear assessment with the use of Digmicroprof microscope is developed. Calculation of the notch depth and residual service life expectancy is carried out with the use of specially designed programs in MathCad for all variants of the notch type.

Keywords: digital microscope, wear, notch, measurement

Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design; E-mail: levleft@mail.ru
- Andrey V. Tikalov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design; E-mail: tikalov2010@mail.ru

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Measurement of machine part wear in field conditions with the use of artificial base method // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 3. P. 237—242 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-237-242