

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННЫХ БАЗ

Л. В. ЕФРЕМОВ, А. В. ТИКАЛОВ, А. Д. БРЕКИ

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

Рассматриваются методика и результаты ускоренных испытаний стальных образцов на износостойкость, выполненных на машине трения с использованием метода искусственных баз.

Ключевые слова: цифровой микроскоп, износ, лунка, измерение, образец, машина трения

С появлением недорогих, но эффективных цифровых микроскопов значительно расширились возможности применения метода искусственных баз (МИБ) [1] для измерения линейных износов поверхности деталей, положенного в основу методики вырезания лунок по ГОСТ 27860-88 и ГОСТ 23301-78 прибором УПОИ-6 [2, 3]. Однако этот прибор не всегда удобен и доступен для практического применения. Поэтому авторами настоящей статьи были организованы новые исследования, направленные на совершенствование МИБ для измерения износов на машинах трения и стендах с применением различных инструментов для нарезания лунок: сверл, фрез, отрезных дисков и пр. [4—6]. В настоящей статье рассматриваются методика и некоторые результаты этих исследований.

Суть метода искусственных баз заключается в нанесении на поверхность трения углубления правильной формы по оси, расположенной по нормали к трущейся поверхности. Это углубление называется лункой, а ее глубина — базой h . База h рассчитывается по функции от входного параметра — геометрического размера лунки d на поверхности трения. Основные формулы для оценки величины h_i и области их применения приведены в таблице.

Номер	Формула	Примечание
1	$h_i = \frac{d_i}{2} \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi}{2} \right)$	Применяется при вертикальном воздействии; φ — рабочий угол инструмента; для сверла при $\varphi = 118^\circ$ $h = 0,3 d$; для алмазной призмы при $\varphi = 136^\circ$ $h = 0,2 d$
2	$h_i = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_i}{D} \right)^2} \right)$	Применяется для инструментов в форме шара при вертикальном вдавлении или фрезеровании; D — диаметр инструмента (например, шарика)
3	$h_i = \frac{d_i^2}{4D}$	Применяется для надреза диском поперек пути трения, D — диаметр диска мини-, болгарки
4	$h_i = \frac{d_i^2}{8} \left(\frac{2}{D} \pm \frac{1}{R} \right)$	Применяется для надреза диском вдоль пути трения; R — радиус поверхности трения; знак „минус“ — при вогнутой поверхности, знак „плюс“ — при выпуклой поверхности
5	$h_i = 0,52 d_i^{1,12}$	Эмпирическая формула для керамического пера; применяется при вертикальном воздействии на поверхность высокой твердости

Поскольку принцип МИБ состоит в том, что по мере изнашивания поверхности при каждом i -м измерении после наработки t_i (между моментами T_0 и T_i) входной параметр d_i и база h_i будут уменьшаться, то износ поверхности Δ_i следует рассчитывать по формулам

$$\Delta_i = h_0 - h_i, \quad (1)$$

$$t_i = T_i - T_0 \tag{2}$$

Исследования выполнялись на машине трения СМЦ-2 в лаборатории трения и смазки СПбПУ Петра Великого (обычно эти машины используются в учебном процессе для изучения природы трения [2]). Программой исследований предусматривалось решение таких задач, как совершенствование методов сравнительной оценки износостойкости разных материалов, изучение влияния режимов работы на интенсивность изнашивания, уточнение вероятностных моделей долговечности узлов трения машин и пр.

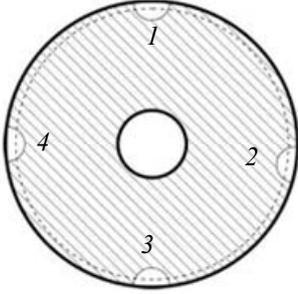


Рис. 1

Испытания на машине трения выполнялись по схеме „диск—колодка“ с целью выбора условий и режимов, обеспечивающих оптимальную продолжительность испытаний для достижения значимого износа поверхности колодки. Объект исследования — четыре лунки, которые изначально нарезались на сверлильном станке по окружности на поверхности образца: см. рис. 1, где 1, 2, 3 и 4 — номера лунок, пунктиром обозначен диаметр диска после изнашивания.

С помощью цифрового микроскопа определялись размер d_0 лунок (d_0 — входной параметр в начале испытаний в момент T_0) и рассчитывалась их глубина h_0 по соответствующей формуле (см. таблицу). После этого диск подвергался испытаниям на износ в паре с исследуемой колодкой при заданных нагрузке G , частоте вращения n и условиях трения (сухое или гидродинамические). Испытания продолжались некоторое время t_i , по окончании которого выполнялись повторные измерения размера d_i лунки с вычислением глубины h_i : это позволяло рассчитывать износ Δ_i по формуле (1). Такие сеансы на одном образце могли повторяться несколько раз для построения тренда износа во времени. В качестве основного выходного параметра была принята износостойкость J_s — путь трения, в километрах, пройденный при изнашивании поверхности на 1 мм. Обратную величину можно назвать интенсивностью изнашивания V , которая имеет размерность мм/км или мм/ч. Расчет этих показателей выполняется по формулам

$$J_{s_i} = \frac{\pi D_d n t_i}{1000 \Delta_i},$$

$$V_i = 60 \Delta_i / t_i \text{ или } V = 1 / J_{s_i},$$

где D_d — диаметр диска (как правило, $D_d = 0,05$ м).

Указанные формулы были положены в основу алгоритмов и программ для обработки результатов измерений в редакторах EXCEL и MathCAD. На рис. 2 показан скриншот программы в редакторе EXCEL с результатами обмера четырех лунок, нарезанных сверлом с углом резания $\phi = 118^\circ$ при времени испытаний $t = 4$ мин.

		В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ж	З	И	М
ролик	D		0.05 м	нагрузка	70 кгс	частота	230 об/мин	трен					
начало	0	конец		время	4 мин	циклов	920	путь		0.144513 км			
номер	образец	параметр	d	h	d1	h1	и1	мм/час	км/мм				
1	сверло	118	3.39	1.0185	2.786	0.8370	0.1814599	2.7218986	0.79639				
2	сверло	118	3.43	1.0305	2.86	0.8583	0.1721466	2.5821985	0.83948				
3	сверло	118	3.5	1.0515	2.893	0.8691	0.1823612	2.7354180	0.79246				
4	сверло	118	3.29	0.9884	2.697	0.8103	0.1781552	2.6723276	0.81117				
		Средняя					0.18	2.6779607	0.8099				
		СКО					0.00	0.07	0.02				
		КВ					0.025901721	0.025901721	0.026321027				

Рис. 2

В редакторе MathCAD разработана универсальная программа расчета интенсивности износа и износостойкости, которая может автоматически выбирать формулы и рассчитывать указанные параметры в зависимости от названия инструмента [4, 7, 8], что позволяет более наглядно оценивать и анализировать результаты серии испытаний.

На рис. 3 приведен график износа диска с колодкой из напильника по результатам пяти измерений диаметра d_i четырех лунок через каждые 4 мин при общей продолжительности измерений 16 мин. В данном случае была обнаружена почти линейная зависимость износа от времени.

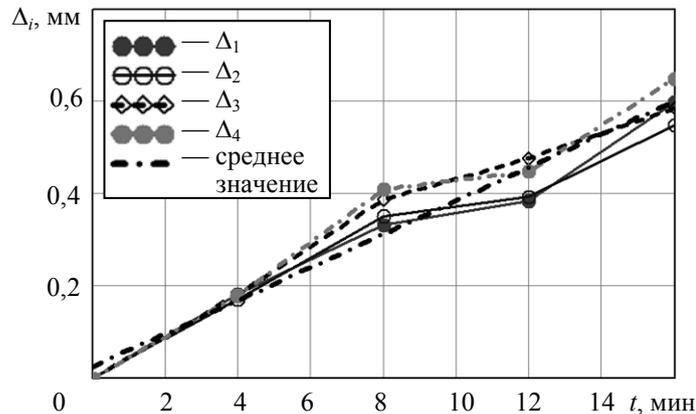


Рис. 3

Приведенные результаты позволяют уверенно утверждать, что износостойкость и интенсивность изнашивания являются объективными критериями для сравнительной оценки не только лабораторных образцов, но и реальных деталей при эксплуатации. В данном примере общая средняя износостойкость составила 0,81 км/мм, а средняя интенсивность изнашивания равна 2,5 мм/ч.

Очевидно, что такой подход вполне приемлем для ускоренных испытаний при сравнительной оценке износостойкости различных материалов. Приведенный пример относится к методике ускоренных испытаний на износ образцов в паре с различными видами колодок, образцы которых для машины трения СМЦ-2 представлены на рис. 4, где 1 — изношенная шайба с лункой, 2 — стандартная колодка после перегрева, 3 — быстро изношенная колодка из абразива, 4 — колодка их куска напильника.

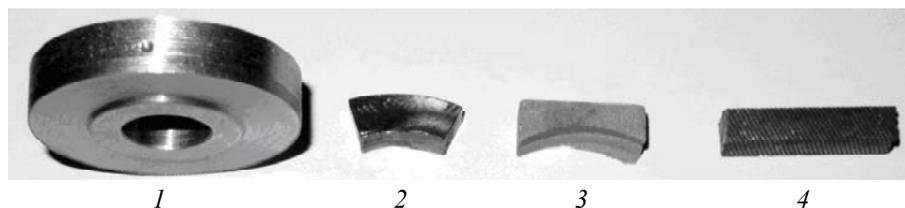


Рис. 4

История этих исследований состоит из нескольких этапов. На первом этапе была предпринята попытка оценить изнашивание диска формальным способом по схеме колодка—диск со смазкой при максимальной нагрузке и умеренной скорости вращения 300 об/мин. Испытания длились примерно 30 ч, но износа за это время обнаружено не было. Таким образом, этот способ был отвергнут и было решено провести такие же испытания при сухом трении без смазки с использованием стандартной колодки. Этот (второй) этап завершился аварийной остановкой машины по причине задира узла трения через 45 мин работы и повышения температуры до $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4, обр. 2 — колодка с цветами побежалости). Соответственно и этот режим пришлось исключить. Третий этап испытаний связан с применением в качестве колодки абразивного бруска (обр. 3). Но и этот способ оказался неудачным: никакого износа диска не произошло, но брусок в течение 0,5 ч сам изнашивался по форме диска.

Следствием указанных неудачных попыток было решение об использовании в качестве контртела куска напильника (см. рис. 4, обр. 4 и рис. 5 — увеличенное фото бархатного напильника (25 зубьев на 1 см)).

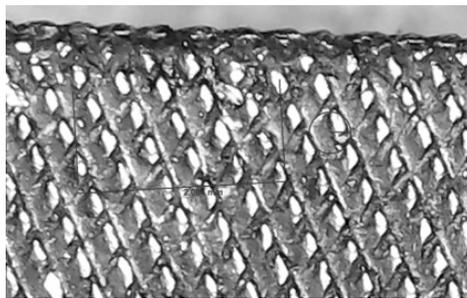


Рис. 5

Напильники изготавливаются из инструментальной углеродистой стали У13 или У13А и закаляются на твердость не ниже 54—58 HRC по методу Роквелла. Согласно измерениям, оказалось, что фактическая твердость используемых новых дисков из стали Ст3 составила порядка 105—140 НВ по Бринеллю, т.е. напильники пригодны для испытаний на износ. Сначала был проверен драчевый напильник при сухом трении — в течение 2 мин произошел сильный износ с повышением температуры. Тогда было принято окончательное решение использовать в качестве контртела напильник со смазкой. При этом была поставлена задача изучить влияние на износ таких факторов, как класс и размеры напильника, частота вращения диска, нагрузка и др., с учетом качества изношенной поверхности (шероховатости), температуры образца, вибрации машины и пр.

Первые испытания этой серии с применением бархатных напильников, проведенные при смазке и постоянной частоте вращения 230 об/мин, позволили установить, что износ 0,15...0,20 мм и износостойкость порядка 1 км/мм можно обеспечить всего за 4 мин. Однако эти испытания сопровождались заметной вибрацией и повышенной температурой. Впоследствии машина вышла из строя из-за среза шпонки. После ремонта машины и последующей корректировки способа крепления колодки из напильника были выполнены испытания при разных скоростях вращения. При этом отмечено снижение вибрации машины и уменьшение температуры до 35... 50 °С.

Приведем некоторые результаты повторных испытаний на износ образца с бархатным напильником и смазкой при скорости вращения 120, 230, 320 и 420 об/мин. Прежде всего, отметим характерный неровный вид изношенной поверхности (рис. 6) и заметное повышение ее твердости до 350 НВ по Бринеллю по сравнению с исходной твердостью 105—140 НВ (физика этого интересного явления требует специального исследования). При этом обнаружена и другая важная и неожиданная тенденция — с увеличением скорости вращения износостойкость возросла, а интенсивность износа снизилась при умеренном повышении температуры от 30 до 50 °С.



Рис. 6

При анализе результатов измерений в редакторе EXCEL были подсчитаны такие статистические параметры величин, как средние и медианные значения, СКО и коэффициент ва-

риации износостойкости. Учитывая большую дисперсию измерений диаметра по причине наволакивания упрочненной и хрупкой корки износа на лунку (см. рис. 6), представляется целесообразным оценить квантили износостойкости для вероятности 0,25, 0,5 (медиана) и 0,75, а затем проанализировать нижний гарантированный 25 %-ный уровень. Зависимости рассматриваемых параметров (J_s и T) от скорости вращения (n), приведенные на рис. 7, а, б соответственно, подтверждают увеличение износостойкости до 4 км/мм при увеличении скорости вращения до 420 об/мин.

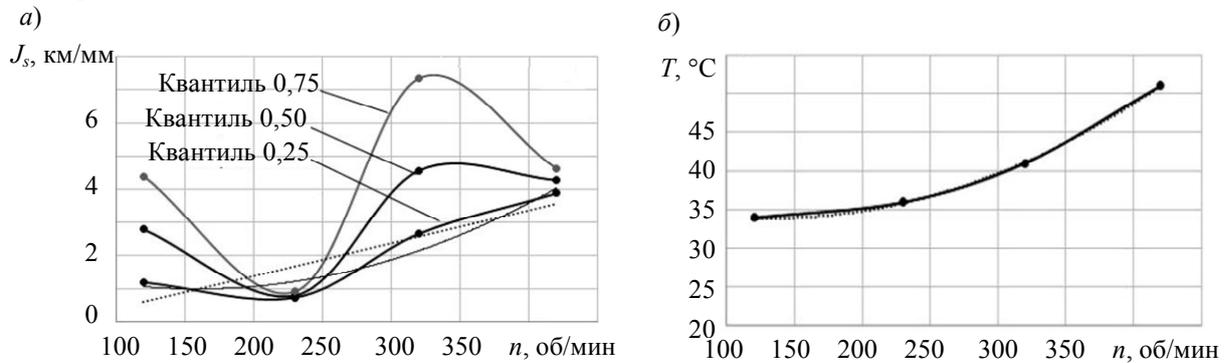


Рис. 7

Обсуждались различные версии этого явления, включая эффект Герси — Штрибека [2]. Однако, скорее всего, оно связано с упрочнением поверхности из-за наклепа по мере повышения скорости вращения. Это косвенно подтвердилось при изменении режимов испытаний, когда сначала были выполнены измерения при максимальной скорости 400 об/мин, а затем при пониженной до 100 об/мин. По-видимому, в этом случае при больших оборотах произошло максимальное повышение твердости поверхности, а при переходе на 100 об/мин износ поверхности происходил с той же интенсивностью без дальнейшего упрочнения. В результате была получена практически одинаковая износостойкость 3,5 км/мм для двух сеансов испытаний на разных скоростных режимах. При выполнении испытаний впервые проверена и подтверждена эффективность контроля узла трения путем измерения ускорения низкочастотной и высокочастотной вибрации с использованием виброметра фирмы ВАСТ (Санкт-Петербург).

Представленные промежуточные результаты ускоренных испытаний износостойкости круглых образцов на машине трения на основе метода искусственных баз с применением напильников в качестве колодок в паре трения с диском подтверждают возможность непосредственного измерения линейной износостойкости для сравнительной оценки свойств материалов и прогнозирования ресурса деталей машин. Обнаруженные тенденции снижения интенсивности износа вследствие повышения твердости поверхности образцов должны быть изучены более обстоятельно путем корректировки программы испытаний с включением в нее таких процедур, как измерение твердости ультразвуковым твердомером, измерение вибрации в низко- и высокочастотных диапазонах, измерения шероховатости и температуры.

Приведенные в статье результаты еще раз подтвердили целесообразность более широкого применения метода искусственных баз в научной и практической деятельности.

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. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский; Под ред. Д. Г. Громаковского. Самара: СГТУ, 2000. 268 с.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
4. Ефремов Л. В. Вероятностные проблемы ресурсных испытаний. СПб: Art-Xpress, 2014. 160 с.

5. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.
6. 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.
7. Ефремов Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб: Наука, 2008.
8. 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: levlefr@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: tikalov2010@mail.ru
- Александр Джалильевич Бреки** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: albreki@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники Университета ИТМО

Поступила в редакцию
05.04.16 г.

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В., Бреки А. Д. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.

**ACCELERATED TESTING OF STEEL SAMPLES
ON THE DURABILITY BY THE ARTIFICIAL BASES METHOD**

L. V. Efremov, A. V. Tikalov, A. D. Breki

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195521, St. Petersburg, Russia
E-mail: levlefr@mail.ru*

The artificial bases method of accelerated testing of steel samples durability is considered. Results of the tests carried out with the use of friction machine are presented.

Keywords: digital microscope, wear, hole, measurement, sample friction machine

Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design; E-mail: levlefr@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
- Alexander D. Breki** — PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design; E-mail: albreki@yandex.ru

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V., Breki A. D. Accelerated testing of steel samples on the durability by the artificial bases method // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 8. P. 671—676 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-671-676