
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT,
SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 921.01
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОС

Л. В. ЕФРЕМОВ^{*1}, А. В. ТИКАЛОВ²

¹ *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

^{*} *levlefr@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. На основе расчетных и экспериментальных исследований рассмотрены и решены актуальные задачи выбора наиболее эффективных инструментов для определения износа материалов методом искусственных баз. Основное внимание уделено проблемам обеспечения точности, надежности и доступности инструментов с учетом требуемого диапазона линейного и объемного износа при использовании пар трения с постоянным и переменным удельным давлением.

Ключевые слова: давление, диск, износ, износостойкость, материал, трибометр, образец, оценка, трение, хорда

Ссылка для цитирования: Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Современные способы испытаний материалов на износ // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 886—894. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894.

MODERN METHODS OF TESTING MATERIALS FOR WEAR

L. V. Efremov^{*1}, A. V. Tikalov²

¹ *Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*} *levlefr@mail.ru*

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

Abstract. On the basis of computational and experimental studies, topical problems of choosing the most effective tools for determining the wear of materials by the method of artificial bases are considered and solved. The main attention is paid to the problems of ensuring the accuracy, reliability and availability of tools, taking into account the required range of linear and volumetric wear when using friction pairs with constant and variable specific pressure.

Keywords: pressure, disk, wear, wear resistance, material, tribometer, sample, evaluation, friction, chord

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Modern methods of testing materials for wear. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 12. P. 886—894 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894.

Общие положения. Основной задачей настоящей работы является помощь исследователям в выборе наилучших инструментов для измерения износов образцов материалов методом искусственных баз (МИБ).

Возможности этого метода продемонстрируем на примере испытаний на трибометрах типа СМЦ-2 двух видов пар трения, применяемых при сравнительном тестировании материалов (рис. 1, а). Сначала подробно рассмотрим серийную колодку (см. рис. 1, б) с полным кон-

тактом округлых поверхностей трения колодки и диска, что приводит к работе при постоянном давлении. В этом варианте, который относится к стандартному методу измерений, искусственная база образуется специальным инструментом, выбор которого является одной из задач настоящего исследования. В этом случае для определения износа поверхности следует выполнять два измерения базы — до и после сеанса испытаний.

Второй вариант пары трения (рис. 1, в) используется в так называемом методе хорды „block-on-ring“ при переменном давлении [1, 2]. На первый взгляд, рассматриваемые варианты пар трения мало отличаются друг от друга. Однако использование образца исследуемого материала в виде плоского бруска (1, рис. 1, в) создает иные условия износа при испытаниях. В процессе испытаний диск 2 врезается в плоскую поверхность бруска 1, образуя износ в виде сегмента с хордой, длина которой изменяется от нуля до L . Поэтому износ измеряется один раз по окончании сеанса. Длина хорды L условно является искусственной базой, которую можно просто и точно оценивать любым мерительным инструментом. При этом она служит аргументом всех функций, входящих в упрощенный алгоритм расчета характеристик износа.

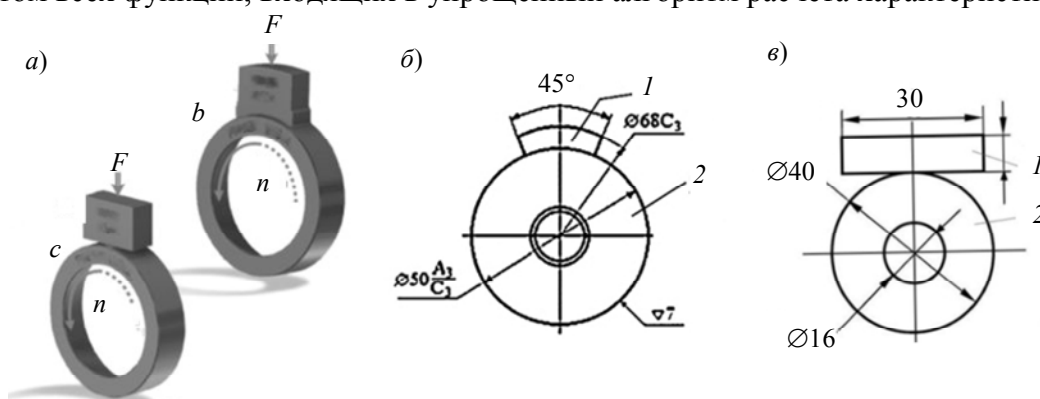


Рис. 1

Целью испытаний на износ материалов является оценка их линейной и (или) объемной износостойкости. Для этого при испытаниях любого из вариантов пар трения (см. рис. 1) должны быть определены или назначены следующие исходные данные:

- размеры: R — радиус диска 2 или кругового пути трения, мм; H_k — ширина колодки 1, мм; γ — плотность материала колодки, г/мм³;
- режим испытаний: n — частота вращения диска 2, об/мин; t — продолжительность сеанса испытаний, мин; F — нагрузка на образец 1, Н;
- результаты испытаний: l_0 и l_1 — размеры искусственной базы до и после сеанса испытания, мм; L — длина хорды, мм.

По данным испытаний материалов на износ рассчитываются удельное давление:

$$P = F/B; \quad (1)$$

объемная износостойкость

$$\varepsilon_W = 10^{-3} F S/W \quad (\text{Нм/мм}^3); \quad (2)$$

линейная

$$\varepsilon_L = S/h = 2\pi R n t/h = 1000 \varepsilon_W/P \quad (\text{мм/мм}). \quad (3)$$

При этом в числителе формул (1)—(3) расположены значения пути трения

$$S = 2\pi R n t \quad (\text{мм}) \quad (4)$$

и заданной нагрузки F , которые применяются для всех вариантов пар трения (см. рис. 1).

Входящие в знаменатель формул (1)—(3) величины — площадь пятна контакта B (мм²), линейный h (мм) и объемный износ W (мм³), а также массовый износ G (г) — определяются ниже с учетом особенностей пар трения.

Стандартный метод испытания серийной колодки. Рассмотрим проведение испытаний на износ серийной колодки типа 1 (см. рис. 1, б) с учетом МИБ. Метод основан на образовании специальных лунок с заданным сужающимся в глубину профилем, наносимых на исследуемую поверхность. Лунки могут иметь различную форму в зависимости от способа ее образования [3].

Первый способ заключается в получении отпечатка индентора шарообразной, пирамидальной или конической формы. Этот способ применять не рекомендуется ввиду неудобства использования для стационарных твердомеров по Виккерсу и Бринеллю, а также по причине повышения погрешности при вдавливании пирамидального, конического или шарового индентора из-за поднятия металла вокруг отпечатка и образования вокруг него „навалов“ (рис. 2).

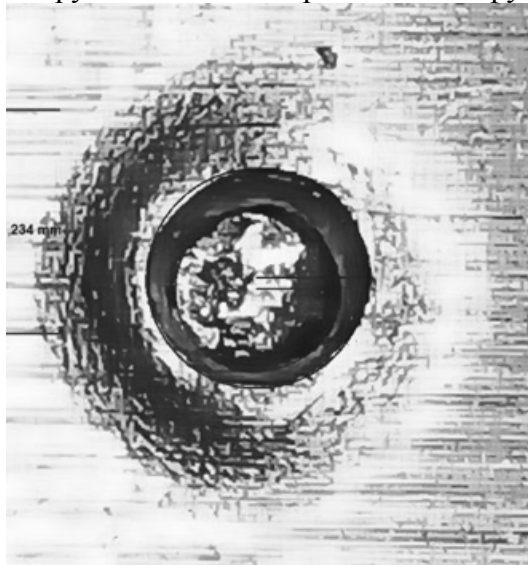


Рис. 2

Второй способ заключается в образовании лунки путем создания углубления различного профиля, когда металл удаляется путем резания с образованием стружки или врезания диска в плоский образец. Подобный способ и был назван методом искусственных баз (МИБ). Искусственной базой можно назвать внешнее изображение лунки на поверхности образца. Как показано на рис. 3, а, размер искусственной базы l_0 и l_1 , измеряемый с помощью оптического микроскопа, позволяет затем рассчитать значение глубины лунки до Δ_0 и после Δ_1 сеанса испытаний с целью оценки износа h за это время по соотношению

$$h = \Delta_0 - \Delta_1. \quad (5)$$

Описание МИБ приводится во многих публикациях о трении и износе. Однако конкретные данные об инструментах для нарезания лунок удалось найти в трудах создателей МИБ [3, 4], которые предложили только один вариант формы лунки в виде продолговатой щели с заостренными концами. Для этого были разработаны стандарты ГОСТ 23.301-78 и ГОСТ 27860-88, согласно которым указанные лунки образуются с помощью специального прибора алмазным резцом в форме трехгранной пирамиды (рис. 3, а). Резец вращается вокруг оси с радиусом траектории $r = 11$ мм, постепенно углубляясь в поверхность детали. После нескольких его оборотов образуется лунка первичной длиной l_0 и глубиной Δ_0 . В результате сеанса испытаний база уменьшается до величины l_1 , которая соответствуют глубине Δ_1 и износу h по формуле

$$\Delta = \frac{l^2}{8r}. \quad (6)$$

Как указано в стандарте, необходимым элементом прибора является микроскоп с линейным увеличением не менее 3,7 крат. Такой прибор приобрести сейчас невозможно, а его изготовление требует больших средств и времени. Не меньше проблем возникает с технологией нарезания лунки при постоянном контроле процесса с помощью микроскопа. Вследст-

вие повышения концентрации напряжений по причине заостренной формы величина лунки не должна превышать 4 мм. Как будет показано далее, это отрицательно отразится на диапазоне значений износа.

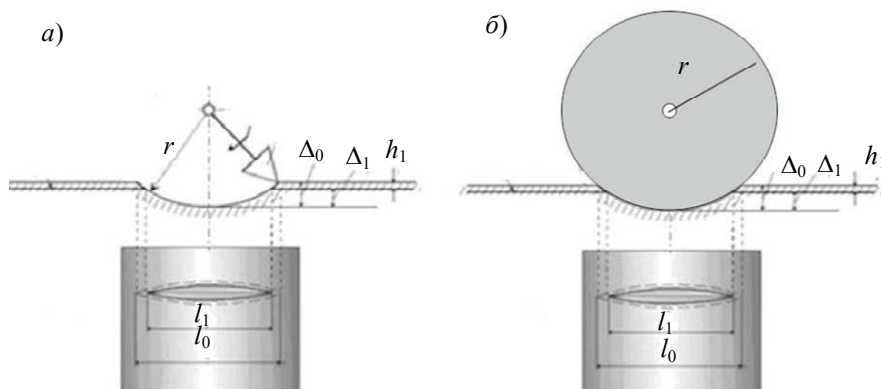


Рис. 3

В работе [4] глубину лунки за время испытаний плоских поверхностей, а также цилиндрических поверхностей при расположении лунки поперек образующей цилиндра вычисляют по приближенной формуле (6), а износ — по (5).

Отмеченные недостатки исходного варианта МИБ позволяют поставить и решить задачу усовершенствования этого метода путем разработки более простых, экономичных, точных и надежных инструментов для определения как линейной, так и объемной износостойкости материалов.

Как показано на рис. 4, в состав лабораторного оборудования следует включить электронный цифровой микроскоп 1 с увеличением 50—500 крат в сочетании с ноутбуком 3. Программное обеспечение микроскопа должно включать программу распознавания образов для измерения фотографий искусственных баз любой формы 4 на поверхности образца 2, в том числе окружность.



Рис. 4

Разработка эффективных инструментов для МИБ. Главной задачей следует считать обоснование новых инструментов для точного нарезания лунок с помощью сверлильного станка за счет строго вертикального перемещения инструмента [5].

С этой целью выполнены пробные образования баз различными способами (рис. 5): *а* — ударным вдавливанием шарика, *б* — высверливанием сверлом при $\varphi = 118^\circ$, *в* — выскабливанием сверлом для керамики, *г* — фрезерованием шарообразной минифрезой, *д* — надрезом миниболгаркой радиусом $r = 12$ мм и др. [6].

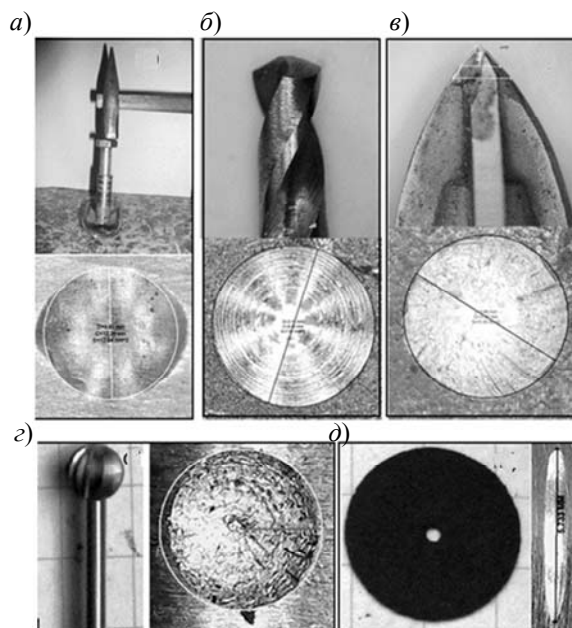


Рис. 5

Анализ результатов эксперимента [5] позволил в качестве основного рабочего инструмента выбрать обычное сверло по ГОСТ 10902-77 с углом заточки 118° (рис. 6, а). Высокие качество и точность образования первичной круглой лунки диаметром до 4 мм обеспечиваются за счет фабричного изготовления и использования только режущей части сверла (рис. 6, б).

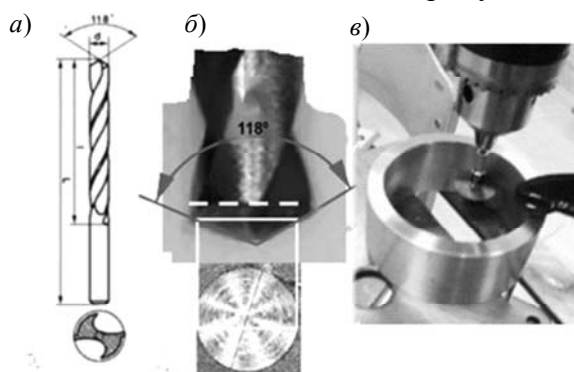


Рис. 6

На основании геометрических соображений доказана функция глубины Δ от диаметра лунки $d = l$:

$$\Delta = \frac{d}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{d}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{118^\circ}{2}\right)} = 0,3 d . \quad (7)$$

Это значит, что при диаметре $d = 4$ мм получаем ее максимально приемлемую глубину около $\Delta = 1,2$ мм.

Вторым рабочим инструментом выбрана миниболгарка радиусом $r = 12$ мм из ювелирного набора инструментов. Она позволяет за счет быстрого касания этого инструмента поверхности при вращении на сверлильном станке получить такую же по форме и размерам лунку (рис. 6, в), которая образуется прибором по ГОСТ 23.301-78 (рис. 2, б). Однако этот способ несоизмеримо проще, надежнее и экономичнее. Общим недостатком образования щелеобразной лунки является ее малая глубина. При $l_0 = 4$ мм и $l_1 = 0$ по формуле (6) получаем $\Delta = P/(8r) = 4^2/(8 \cdot 12) = 0,167$ мм, что не всегда допустимо, по сравнению, например, со сверлом, у которого $\Delta = 1,2$ мм.

Здесь уместно привести доказательство происхождения простой формулы (7) для оценки глубины лунки Δ путем разложения в ряд Тейлора точного геометрического выражения:

$$\Delta = r \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2r} \right)^2} \right) \text{series, } l, 6 \Rightarrow \frac{l^2}{8r} + \frac{l^4}{128r^3} + \dots \approx \frac{l^2}{8r}. \quad (8)$$

Видно, что формула (7) является первым членом этого ряда [7]. Это обеспечивает малую погрешность упрощенного алгоритма расчета. Программой MATHCAD установлено, что при $l = 4$ мм она составляет меньше одного процента: погрешность $\rho = (\Delta_1 - \Delta) / \Delta_1 = (0,168 - 0,167) / 0,168 = 0,7 \%$.

Важно отметить, что точность нарезания исходной лунки длиной l_0 или диаметром d_0 не имеет принципиального значения, потому что износ рассматривается как разница глубин $h = \Delta_0 - \Delta_1$ по (6).

Алгоритмы оценки износа серийной колодки. Изучение линейного износа МИБ серийного образца типа рис. 1, б целесообразно завершить методикой расчетной оценки его объемного W и массового G износа [8].

Для решения этой задачи с погрешностью не более 2 % при износе менее 1 мм использовали следующие данные: радиус диска $r = 25$ мм, ширина колодки $H_k = 10$ мм, угол колодки $\varphi = 45^\circ$, плотность материала (сталь) $\gamma = 0,0075$ г/мм³. Линейный износ h при $l_1 = 0$ и $l_0 = 4$ мм определен по формуле (7) для миниболгарки и по формуле (8) — для сверла.

$$L \approx \frac{\varphi}{180} \pi R = 0,25 \pi R; \quad (9)$$

$$B = L H_k; \quad (10)$$

$$W = B h; \quad (11)$$

$$G = W \gamma. \quad (12)$$

Условная хорда (точнее, длина контакта) L рассчитана по формуле (9), площадь пятна контакта B — по формуле (10), объемный износ W — по формуле (11) и массовый износ G — по формуле (12).

Алгоритмы оценки износа методом хорды „block-on-ring“ [1, 2]. Как было отмечено ранее, при испытаниях прямоугольных колодок (рис. 1, в) исходным показателем является не износ, а размер хорды L лунки в виде сегмента, который обычно находится в пределах от 0,5 до 12—14 мм. Увеличение хорды связано с уменьшением твердости материала или возрастанием шероховатости контртела (поверхности диска). В работах [7, 8] показано упрощение алгоритмов оценки объемного и линейного износа от хорды. На основании разложения точных геометрических выражений в ряд Тейлора удалось доказать, что с погрешностью до 2 % для расчета этих показателей можно применить простейшие функции $W = L^3/12r$ и $h = L^2/12r$. Подобный прием был применен при доказательстве МИБ (8) для лунки типа рис. 3, а по ГОСТ 23.301-78.

На рис. 7 выполнен корреляционный анализ зависимости погрешности расчета σ линейного износа h (кривая 1) и площади пятна контакта B (2) от хорды L . Это позволило решить обратную задачу обоснования для B и h точных функций.

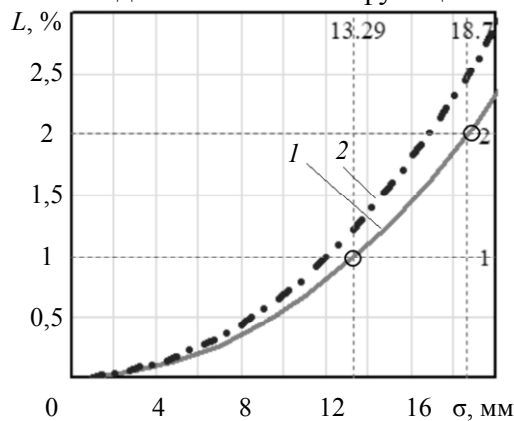


Рис. 7

Оценка объемного W и массового износа G выполняется по указанным ранее формулам.

Завершающим этапом испытаний материалов на износ всех пар трения является расчет объемной ε_W и линейной ε_L износостойкости по формулам (2) и (3) с последующей оценкой по ГОСТ 23.001-2004*:

$$B = \left(1 + L^{2,03} / 1,53 \cdot 10^4\right) L H_k, \quad (13)$$

$$h = \left(1 + L^{2,03} / 1,91 \cdot 10^4\right) L^2 / 12 r. \quad (14)$$

Варианты выбора пар трения и инструментов для измерения износов. Для обоснования рекомендаций по выбору оптимальных планов испытаний образцов материалов на износ рассмотрим особенности типов пар трения и инструментов с учетом оценки параметров при одинаковом износе $h = 0,167$ мм (табл. 1) и зависимости линейного h и массового G износа от размера искусственной базы для используемых инструментов (табл. 2).

Таблица 1

Расчет износостойкости пар трения при линейном износе $h = 0,167$ мм

Пара трения	B , мм ²	W , мм ³	P , МПа	S , мм	ε_W , Нм/мм ³	ε_L , мм/мм	G , г
Рис. 1, б	196,35	29,45	1,02	$1,41 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^3$	$9,42 \cdot 10^6$	0,245
Рис. 1, в	70,6	11,8	2,82	$1,41 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^4$	$9,42 \cdot 10^6$	0,089

Приведенные в этих таблицах результаты получены при следующих исходных данных:

— размеры пары трения: $R = 25$ мм; $H_k = 10$ мм; $\gamma = 0,0075$ г/мм³;

— режим испытаний: $n = 100$ об/мин, $t = 30$ мин, $F = 200$ Н;

— результаты измерений: болгаркой — $r = 12$ мм, $l_0 = 4$ мм, $l_1 = 0$, $\Delta_0 = 12/8r = 0,167$ мм; сверлом — $d_0 = 4$ мм, $d_1 = 0$, $\Delta_0 = 0,3d_0 = 1,2$ мм, $\Delta_1 = 0$, $h = \Delta_0 - \Delta_1 = 1,2$ мм; методом хорды — $L = \sqrt{12hR} = 7,08$ мм.

Таблица 2

Зависимость линейного и массового износа от метода образования баз

„block-on-ring“			Болгарка			Сверло		
L , мм	h , мм	G , г	l , мм	h , мм	G , г	d , мм	h , мм	G , г
1	0,003	0	0,5	0,003	0,004	0,555	0,167	0,245
2	0,013	0,002	1	0,01	0,015	1	0,3	0,442
4	0,053	0,016	2	0,042	0,061	2	0,6	0,884
7,08	0,167	0,089	3	0,094	0,138	3	0,9	1,325
20	1,333	2	4	0,167	0,245	4	1,2	1,767

Путь трения S рассчитан по формуле (4), площадь пятна контакта B , объемный W и массовой износ G для серийной пары трения типа рис. 1, б — по (9)—(12). Для метода „block-on-ring“ по результатам измерений хорды L вычисляются площадь пятна контакта B и линейный износ h по формулам (13) и (14). Таким образом, получены все данные, позволяющие определить удельное давление P , объемную ε_W и линейную ε_L износостойкость по (2) и (3) [8].

Выводы и рекомендации. Приведенные результаты позволяют сформировать основные выводы и рекомендации по выбору рациональных средств измерения износов материалов.

Прежде всего следует отметить явное преимущество метода хорды „block-on-ring“ типа рис. 1, в, по сравнению с серийной колодкой типа рис. 1, б. Пара трения метода хорды в виде прямоугольного бруска имеет низкую стоимость и проста в изготовлении. Метод не требует нарезания лунок, которые образуются автоматически с высокой точностью при врезании диска в плоскую поверхность бруска, позволяющей оценивать объемный и массовый износ по данным о хорде сегмента износа. Такая пара трения работает с переменным удельным давлением из-за увеличения площади пятна контакта по мере изнашивания. Как видно из табл. 1 и 2,

* ГОСТ 23.001-2004. Обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2005.

брусок метода хорды имеет малую массу, соизмеримую с погрешностью весов. Поэтому в этом случае применять способ взвешивания нежелательно по сравнению с серийной колодкой.

Метод искусственных баз с нарезанием лунок применяется в парах трения с колодками типа рис. 1, б, которые имеют контакт по всей длине поверхности с диском. Это обуславливает постоянство давления в пятне контакта и возможность применения либо метода взвешивания, либо способа нарезания лунок.

Отмечается сомнительная пригодность для этой цели классического способа нарезания удлиненных лунок алмазным резцом с помощью приспособления по ГОСТ 23.301-78 и ГОСТ 27860-88 по причине сложности его изготовления и применения.

Такую же лунку можно получить простейшим ювелирным инструментом в виде мини-болгарки. Недостатком обоих этих средств является малая глубина лунки порядка 0,16 мм при ее длине менее 4 мм, что необходимо учитывать в зависимости от области применения материала.

Анализ результатов многочисленных экспериментов позволил в качестве основного рабочего инструмента выбрать обычное сверло по ГОСТ 10902-77 с углом заточки 118° (рис. 6, а). Высокие качество и точность образования первичной круглой лунки диаметром до 4 мм обеспечиваются за счет фабричного изготовления и использования только режущей части сверла (рис. 6, б). При этом инструмент имеет низкую стоимость и малую трудоемкость оценки износа по простой тригонометрической функции.

Для обеспечения достоверности измерений в состав лабораторного оборудования следует включить электронный цифровой микроскоп с увеличением 50—500 крат в сочетании с ноутбуком. Программное обеспечение микроскопа должно включать программу распознавания образов для измерения фотографий искусственных баз любой формы, включая окружность. Точность нарезания лунок обеспечивается применением сверлильного станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test, norm G77-05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States.
2. Испытание на износ блока на кольце NANOVEA [Электронный ресурс]: <<https://nanovea.com/block-on-ring-sliding-wear-evaluation/>>.
3. Хрущов М. М., Беркович Е. С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.
4. Хрущов М. М.. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева; 512 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., Бреки А. Д. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671—676.
7. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Метод оценивания линейной и объемной износостойкости материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 1. С. 58—63.
8. Ефремов Л. В., Тикалов А. В. Моделирование процесса изнашивания плоских образцов материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 163—169.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория трения и износа; гл. научный сотрудник;
E-mail: levlefr@mail.ru
- Андрей Владимирович Тикалов** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, кафедра машиноведения и основ конструирования;
E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 31.10.2022.

REFERENCES

1. *Standard Test Method for Ranking resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-ring Wear Test*, norm G77–05 (Reapproved 2010), ASTM International, United States.
2. <https://nanovea.com/block-on-ring-sliding-wear-evaluation/>. (in Russ.)
3. Khrushchov M.M., Berkovich E.S. *Opredelenie iznosa detaley mashin metodom iskusstvennykh baz* (Determination of Wear of Machine Parts by the Method of Artificial Bases), Moscow, 1959, 217 p. (in Russ.)
4. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotverdest' materialov: Izbrannyye raboty* (Friction, Wear and Microhardness of Materials: Selected Works), Moscow, 2011, 510 p. (in Russ.)
5. Efremov L.V. *Problemy upravleniya nadezhnostno-oriyentirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin* (Problems of Managing Reliability-Oriented Technical Operation of Machines), St. Petersburg, 2015, 206 p. (in Russ.)
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. Breki A.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 8(59), pp. 671–676. (in Russ.)
7. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 1(65), pp. 58–63. (in Russ.)
8. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 163–169. (in Russ.)

Data on authors

- Leonid V. Efremov** — Dr. Sci., Professor; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Department of Friction and Wear; Chief Researcher; E-mail: levlefr@mail.ru
- Andrey V. Tikalov** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design Basics; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 04.07.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 31.10.2022.