УДК 669.14.018: 256

А.Г. КУЗЬМЕНКО
Хмельницкий национальный университет
О.А. ВИШНЕВСКИЙ
Национальный авиационный университет

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ИЗНАШИВАНИЯ ПО СХЕМЕ МАЛЫШЕВА–ВЕЛЛИНГЕРА– УЭТЦА (MWU)

В статье рассмотрен метод испытаний на износ Малышева-Веллингера-Уэтца (MWU), дан его анализ. Показано, что метод носит качественный характер, проанализированы недостатки. Предложено методом ТПР выполнить построение однофакторной обобщенной модели абразивного изнашивания образцов в абразивной смеси по схеме MWU, а также выполнен силовой и кинематический анализ режимов работы установки по схеме MWU.

In the article the method of tests is considered on the wear of Malyshev-Vellinger-Uets (MWU), his analysis is given. It is rotined that a method is carried by high-quality character, failings are analysed. It is suggested the method of TPR to execute the construction of the odnofaktornoy generalized model of abrasive wear of standards in abrasive mixture on the chart of MWU, and also the power and kinematics analysis of the modes of operations of setting is executed on the chart of MWU.

Ключевые слова: методы испытаний, абразивный износ, теория методов.

1. Анализ развития метода и постановка задач

1^0. Схемы реализации метода

1) Первое упоминание об использовании метода по схеме – образец движущийся в абразивной смеси (ОДАС) находим в обстоятельной книге Михаила Михайловича Хрущова [3]. Оказывается еще в 1917 году в Сибири испытания по этой схеме были выполнены А.П. Малышовым. При этом им были получены интересные данные о сопротивлении движения образца в сыпучей массе (песке) при разных скоростях образцов из свинца, олова, цинка и меди;

2) Гельвицем К. испытания по аналогичной схеме были выполнены в 1930 г [3]. Объектом испытаний был целый лемех плуга. Результаты испытаний сопоставлялись с результатами полных испытаний. После уплотнения песок перемешивался специальными скребками. Влажность песка была 10 %. При меньшей влажности наблюдалось пыление при большей залипание лемеха и образование песчаных подушек. Линейная скорость образца была 3м/с. Зернистость абразива 0,25-1 мм.

Износ определялся по потере массы путем взвешивания. Интересно, что износ лемеха на стенде был в 6 раз меньше чем при эксплуатации в аналогичных условиях.

3) Серпик Н.М. и Кантор М.М. в 1964 в БИТМе Брянск по схеме ОДАС провели испытания на износ в абразиве 47 видов сталей при 350 видах термообработки. Скорость движения образца 1,46 м/с, абразив дробленый кремний, зернистость 0,25– 1,0 мм; базовый путь трения образца 600 км.

Износ измерялся по потере массы.

Относительная износостойкость определялась как отношение потери массы на базовом пути испытываемого и эталонного образца.

В процессе испытаний установлено, что отношение износа стали: 1) ГІЗЛ – отожженная; 2) ГІЗЛ – закаленная; 3) ГІЗЛ – закаленная и отпущенная составляют рад 1: 0,75; 0,5.

4) Веллингер и Уэтц в 1963 году опубликовали варианты и результаты испытаний по схеме MWU.

В связи с этим далее будем называть метод Малышева, Веллингера, Уэтца – MWU.

2^0. Анализ недостатков метода и постановка задач показывает, что:

1) Основным недостатком метода ОДАС является отсутствие модели изнашивания и, как следствие, невозможность переносить результаты на другие силовые, кинематические и геометрические условия проведения испытаний.

2) Определение износа методом взвешивания образцов превращают эти варианты метода в чисто качественные.

3^0. В связи с этим принята для решений постановка следующих задач исследования:

1) Разработать обобщенную многофакторную модель абразивного изнашивания;

2) разработать методику определения параметров разработанной модели изнашивания;

3) дать основы конструирования установок по абразивному изнашиванию по схеме MWU;

4) спроектировать и изготовить установку для испытаний на абразивный износ по схеме образец движущихся в абразивной смеси MWU с разными вариантами образцов цилиндра, ножи;

5) разработать методику испытаний на износ по схеме MWU с определением параметров модели изнашивания;

6) провести испытания на абразивный износ с определением параметров модели для разных материалов по разным схемам;

7) сделать выводы о теоретической ценности и практической применимости предложенного метода испытаний по схеме MWU.

2. Построение многофакторной обобщенной модели абразивного изнашивания по схеме MWU методом теории подобия и размерностей (ТПР)

1^0. В соответствии с методом ТПР на первом этапе составляется перечень всех определяемых и определяющих величин с их размерностями

1) определяемой величиной будем считать интенсивность износа

$$du_w / ds,$$

где u_w, мм – износ образца; s, мм – путь трения частиц песка по образцу;

2) в качестве определяющих величин или основных факторов, влияющих на абразивный износ

σ, кг/мм^2 – давление песка на образце;

HB, кг/мм^2 – твердость материала образца;

v, мм/с – скорость скольжения абразивных частей по образцу;

δ, мм – размер абразивных частиц;

v_0, мм^2/с – кинематическая вязкость сыпучей среды (песка);

$\varepsilon = \dfrac{V_{воды}, \text{мм}^3}{V_{песка}, \text{мм}^3}[1]$ – отношение объема воды к объему песка в смеси;

$T_c^0 C -$ температура абразивной смеси;

$T_{пл}^0 C -$ температура плавления металла образца;

R, мм – радиус цилиндра образца.

2^0. На втором этапе метода ТПР из определяющих $n-$ определяемых величин составляются безразмерные комплексы:

1) определяемый безразмерный комплекс – это интенсивность износа

$$\Pi_w = \frac{du_w}{ds} = \frac{\text{мм}}{\text{мм}}[1]; \tag{2.1}$$

2) или износ на единицу пути трения

$$\frac{u_w}{s} = \frac{\text{мм}}{\text{мм}}[1]; \tag{2.2}$$

3) из определяемых величин можно составить следующие безразмерные комплексы:

4) безразмерное давление;

$$\Pi_\sigma = \frac{\sigma}{HB} = \frac{\text{кг / мм}^2}{\text{кг/мм}^2}[1]; \tag{2.3}$$

5) безразмерная скорость

$$\Pi_v = \frac{v\delta}{v_0} = \frac{\text{мм/с} \cdot \text{мм}}{\text{мм}^2/\text{с}}[1]; \tag{2.4}$$

Этот комплекс соответствует числу или критерию Рейнольдса;

6) объединенный комплекс

$$\Pi_{\sigma v} = \frac{\sigma}{HB} \cdot \frac{v\delta}{v_0}[1]. \tag{2.5}$$

7) гомологическая температура в контакте

$$\Pi_T = \frac{T_c}{T_{пл}} \frac{{}^0C}{{}^0C}[1]. \tag{2.6}$$

3^0. На третьем этапе метода ТПР:

1) из эксперимента устанавливается зависимость между безразмерными комплексами, играющими роль критериев подобия;

2) в качестве основной формы зависимости между безразмерными критериями выберем функцию

вида

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \left(\frac{\sigma}{HB} \right)^m \left(\frac{v\delta}{v_0} \right)^n \varepsilon^k ; \qquad (2.7)$$

3) задавшись базовыми значениями определяющих величин HB_δ, δ_δ, v_0 проводим испытания и принимаем зависимость (2.7) в форме

$$\frac{du_w}{ds} = k'_w \sigma^m v^n \varepsilon^k ; \qquad (2.8)$$

4) в качестве первого варианта модели можно принять $\varepsilon = 1$ (сухой песок) $v = v_\delta$, $n = 1$, тогда

$$\frac{du_w}{ds} = k'_w \sigma^m . \qquad (2.9)$$

3. Методика определения основных величин в процессе абразивного изнашивания

3.1. Определение силы, действующей на образец

1) Расчетная схема представляется цилиндром движущийся в песке;

2) При вращении водила с двумя образцами на образцы действует сила Q уравновешиным моментом M по соотношению

$$M = 2R_в Q , \qquad (3.1)$$

отсюда имеем

$$Q = \frac{M}{2R_в} ; \qquad (3.2)$$

3) момент в системе привода может быть выражен через потребляемую мощность по зависимости вида

$$M = 72400 \frac{N}{n} , \qquad (3.3)$$

где M, кг/см; N, квт; n об/мин;

4) пример: $N = 0,7$ квм; $n = 450$ об/мин;

$$M = 72400 \frac{0,7}{4,50} = 151,5 \text{ кг;}$$

5) сила при $R_в = 38,5$ мм по (3.2)

$$Q = \frac{151,5}{2 \cdot 38 \cdot 5} = 19,7 \text{ кг.}$$

3.2. Определение давления песка на образец:

1) среднее давление на цилиндр при взаимодействии с песком через силу Q можно определить по зависимости

$$\sigma_{ср} = \frac{Q}{DH} , \qquad (3.4)$$

где $D -$ диаметр цилиндра, $H -$ высота цилиндра.

2) Пример 2; при $D = 20 = 22$ мм; $H = 20$ мм; $Q = 19,7$ кг

$$\sigma_{ср} = \frac{19,7}{22 \cdot 20} = 0,045 \text{ кг/мм}^2 = 0,45 \text{ кг/см}^2;$$

3) для определения максимального давления можно применять распределение давления по нормали в виде закона косинуса

$$\sigma(\varphi) = \sigma_0 \cos\varphi ; \qquad (3.5)$$

4) проектируя давления на направление силы Q, имеем

$$\sigma_Q(\varphi) = \sigma(\varphi) \cdot Rd\varphi \cos\varphi , \qquad (3.6)$$

или с учетом (3.5)

$$\sigma_Q(\varphi) = \sigma_0 R d\varphi \cos\varphi\,; \tag{3.7}$$

5) из условия равновесия силы Q и давлений $\sigma_Q(\varphi)$ имеем

$$Q = 2l\int_0^{\pi/2} \sigma_0 R\cos^2\varphi d\varphi\,; \tag{3.8}$$

6) учитывая, что

$$\int \cos^2\varphi d\varphi = \frac{\varphi}{2} + \frac{\sin^2\varphi}{4}, \tag{3.9}$$

имеем

$$Q = 2\sigma_0 Rl\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin^2\varphi}{4}\right)\Bigg|_0^{\pi/2} = 2\sigma_0 Rl\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\sin^2\pi/2}{4}\right),$$

$$Q = \frac{1}{2}\sigma_0 R\pi l\,, \tag{3.10}$$

6) отсюда имеем

$$\sigma_0 = \frac{2Q}{\pi Rl} = \frac{2\cdot 2Q}{2\pi Rl} = \frac{4}{\pi}\sigma_{cp} = 1,273\sigma_{cp}\,,$$

$$\sigma_0 = 1,273\sigma_{cp}\,, \tag{3.11}$$

Пример 3. $\sigma_0 = 0,45$ кг/мм^2; $1,273 = 0,0573$ кг/мм^2

7) твердость материала образца, латуни по справочнику

$$HB = 35 \text{ кг/мм}^2; \tag{3.12}$$

8) дисперсность абразивной среды

$$\delta = 0,2 - 0,3 \text{ мм}. \tag{3.13}$$

3.3. Определение пути и скорости трения песка по образцу

1) схема: цилиндр обтекаемый песком;

2) на угле $\varphi \pm \pi/2$ за один цикл путь трения s будет равен

$$s = R\varphi = R\pi/2\,; \tag{3.14}$$

3) в точке $\varphi = \pi/2$ путь трения за один оборот равен длине окружности описывается точкой $\varphi = \pi/2$

$$s(\varphi = \pi/2) = \pi R_в\,; \tag{3.15}$$

4) скорость трения v по определению

$$v = s/t_1\,,$$

где $t-$ продолжительность одного оборота

$$t_1 = \frac{\text{мин}}{n}\,,$$

пример $n = 450$ об/мин; $t_1 = \dfrac{60\text{с}}{450} = 0{,}13\text{с}$

$$s = \pi\cdot 38,5 = 120,95 \text{ мм за оборот},$$

$$v = \frac{120,95\text{мм}}{0,13} = 930,38 \text{ мм/с} = 0,93 \text{ м/с}.$$

3.4. Метод определения вязкости гидроабразивной смеси воды и песка

1^0. Меры вязкости

1) динамическая вязкость

$$F = \mu s\frac{dv}{dx}, \tag{3.16}$$

или

$$\left.\begin{aligned} \tau &= \mu\frac{dv}{dx} \\ \tau &= \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \\ v &= \frac{\text{мм}}{\text{с}} \\ dx&, \text{мм} \end{aligned}\right\} \qquad \mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dx}}\,; \tag{3.17}$$

$$\mu = \frac{\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}}{\frac{\text{мм}}{\text{с}\cdot\text{мм}}} \cdot \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\text{с}\,, \tag{3.18}$$

$$\mu = \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}\text{с}\,, \tag{3.19}$$

2) кинематическая вязкость v_0

$$v_0 = \frac{\mu}{\rho}\,,$$

3) ρ, плотность

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3}\,, \tag{3.20}$$

4) $m -$ масса

$$m = \frac{F}{a} = \frac{\text{кгс}}{\text{мм/с}^2} = \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{мм}}\,, \tag{3.21}$$

5) плотность

$$\rho = \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{мм}}\cdot\frac{1}{\text{мм}^3} = \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{мм}^4}\,, \tag{3.22}$$

6) кинематическая вязкость

$$v_0 = \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{мм}^2}\cdot\frac{\text{мм}^4}{\text{кгс}\cdot\text{с}^2} = \frac{\text{мм}^3}{\text{с}} = v_0\,. \tag{3.23}$$

2^0. Определение кинематической вязкости песка в песочных часах.

1) исходные данные песочных часов на 10 минут: объем песка $V = 10996$ мм^3; диаметр отверстия для высыпания песка $d = 0,3$ мм; $t = 10$ минут;

2) формула для определения кинематической вязкости v_0:

$$v_0 = \frac{v}{\pi dt}\,; \tag{3.24}$$

3) вычисление v_0

$$v_0 = \frac{10896}{\pi\cdot 0,3\cdot 600} = 19,44\frac{\text{мм}^2}{\text{с}} = 19,44 cCm\,.$$

4. Распределение износа по поверхности трения образца и определение параметра k_w

4.1. Модель изнашивания по формуле (4.1)

1) в простейшей линейно-дифференциальной форме

$$\frac{du_w}{ds} = k_w\sigma\,; \tag{4.1}$$

2) в интегральной форме

$$u_w = k_w\sigma s\,; \tag{4.2}$$

3) подставим в это выражение распределение давлений по (3.5) и зависимость пути трения от угла по (3.15)

$$u_w(\varphi) = k_w(\sigma_0 \cos\varphi)R\varphi\,, \tag{4.3}$$

или

$$u_w(\varphi) = Rk_w\sigma_0(\varphi\cos\varphi)\,. \tag{4.4}$$

4.2. Определение экстремума функции распределения давлений

1) определяем производную функции (4.4) и приравниваем нулю

$$\frac{du_w(\varphi)}{d\varphi} = Rk_w\sigma_0(\cos\varphi + \varphi\sin\varphi)\,; \tag{4.5}$$

2) отсюда имеем уравнение

$$\cos\varphi + \varphi\sin\varphi = 0\,; \tag{4.6}$$

или

$$\varphi tg\varphi = -1\,, \tag{4.7}$$

$$\varphi = -\frac{1}{tg\varphi}\,. \tag{4.8}$$

3) для определения вида функции распределения износа по окружности цилиндра производим вычисления функции

$$f(\varphi) = \varphi\cos\varphi\,; \tag{4.9}$$

4) из рассмотрения результатов вычислений следует, что максимум функции (4.9) находим в окрестности точки $\varphi = 50^\circ$

φ	20	30	40	45	50	60	70	80	90
$f(\varphi)$	0,319	0,45	0,534	0,55	0,56	0,52	0,417	0,242	0

4.3. Определение параметра k_w и m по модели (4.2)

1) в случае, если полагать априори $m = 1$, то из (4.2) находим

$$k_w = \frac{u_w}{\sigma s}\,. \tag{4.10}$$

4.4. Определение параметров модели (4.1)

2) в случае, если модель изнашивания принимается в виде

$$u_w = k_w\sigma^m s\,, \tag{4.11}$$

3) то на экспериментальной зависимости

$$u_w(\varphi) = k_w\sigma(\varphi)^m s(\varphi)\,,$$

выбираются две точки $u_{w1}(\sigma_1,\, s_1),\quad u_{w2}(\sigma_2,\, s_2)$

$$\left.\begin{aligned} u_{w1}(\varphi_1) &= k_w\sigma_1(\varphi_1)^m s_1(\varphi_1) \\ u_{w2}(\varphi_2) &= k_w\sigma_2(\varphi_2)^m s_2(\varphi_2) \end{aligned}\right\};\tag{4.12}$$

4) взяв отношение этих двух уравнений, получаем

$$\frac{u_{w1}(\varphi_1)}{u_{w2}(\varphi_2)} = \left(\frac{\sigma_1(\varphi_1)}{\sigma_2(\varphi_2)}\right)^m \frac{\sigma_1(\varphi_1)}{\sigma_2(\varphi_2)}\,; \tag{4.13}$$

5) отсюда имеем

$$m = \frac{\lg\dfrac{u_{w1}(\varphi_1)}{u_{w2}(\varphi_2)} - \lg\dfrac{\sigma_1(\varphi_1)}{\sigma_2(\varphi_2)}}{\lg\dfrac{\sigma_1(\varphi_1)}{\sigma_2(\varphi_2)}}\,; \tag{4.14}$$

6) второй параметр k_w модели можно определить из первого уравнения (4.6)

$$k_w = \frac{u_{w1}(\varphi_1)}{\sigma_1(\varphi_1)^m s_1(\varphi_1)} . \tag{4.15}$$

4.5. Определение параметров k_w, m, n модели

$$u_w = k_w \sigma^m v^n s ; \tag{4.16}$$

1) в этом случае организовываются испытания при разных скоростях v;

2) это можно сделать, располагая образцы на разных расстояниях от центра вращения;

3) для определения трех параметров k_w, m, n из экспериментальных данных выбираются три базовых точки

$$\left.\begin{aligned} u_{w1} &= k_w \sigma_1^m v_1^n s_1 \\ u_{w2} &= k_w \sigma_2^m v_2^n s_2 \\ u_{w3} &= k_w s_3^m v_3^n s_3 \end{aligned}\right\} ; \tag{4.17}$$

4) из решения этой системы находим

$$\left.\begin{aligned} \frac{u_{w1}}{u_{w2}} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^m \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n \\ \frac{u_{w1}}{u_{w3}} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)^m \left(\frac{v_1}{v_3}\right)^n \end{aligned}\right\} , \tag{4.18}$$

или

$$\left.\begin{aligned} \lg u_{w1} / u_{w2} &= m \lg \sigma_1 / \sigma_2 + n \lg v_1 / v_2 \\ \lg u_{w1} / u_{w3} &= m \lg \sigma_1 / \sigma_2 + n \lg v_1 / v_3 \end{aligned}\right\} ; \tag{4.19}$$

5) параметры m, n находятся из решения этой системы;

6) параметры k_w определяется из любого из уравнений (4.17)

4.6. Определение параметров k_w, m, ε модели

$$u_w = k_w \sigma^m \varepsilon^k s , \tag{4.20}$$

где $\varepsilon = V_{песка} / V_{воды} -$ содержание воды в гидроабразивной смеси.

1) методика определения трех параметров k_w, m, k аналогична методике, использованной в п. 4.5.

Далее излагается пример практического применения разработанного и предложенного метода испытаний на гидроабразивной износ по схеме Малышева-Веллингера-Уэтца.

5. Практический пример, испытания на абразивный износ по схеме Малышева-Веллингера-Уэтца. Влияние давления и пути трения

5.1. Характеристика установки и условия испытаний:

1) конструкция: состоит из станка и устройства для крепления двух цилиндрических образцов;

2) диаметр цилиндров $d = 22$ мм;

3) высота рабочей части образов $H = 20$ мм;

4) расстояние между образцами $2R_в = 77$ мм;

5) номинальная мощность Эл. Двигателя станка $N = 0,7$ кВт;

6) номинальные обороты вала двигателя

$$n_{дв} = 370 \text{ об/мин;}$$

7) число оборотов водила с образцами

$$n_в = 450 \text{ об.}$$

8) напряжение на двигателе 380 в;

9) ток холостого хода $J = 2,1$ А; ток под нагрузкой $J = 2,5$ А;

10) напряжение в каждой ветви $U = 240$ В.

2^0. Результаты испытаний латуни стержня в течении 80 часов представлены в таблице 5.1:

1) износ измерялся при вращении образцов в центрах индикатором часового типа через каждые 30° по схеме

Таблица 5.1

Результаты изменений износа

	1	2	3	4	5	6	7
10	0,01	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0
20	0,01	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0
30	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
40	0	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0
50	0,1	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0
60	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
70	0,1	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0
80	0,05	0,1	0,07	0,02	0,09	0,07	0,02

5.2. Обработка первичных результатов испытаний

1) определение пути трения для разных точек поверхности по зависимости (5.14)

$$s = R\varphi, \tag{5.1}$$

при $R = 11$ мм; $s_1(\varphi = 30^{\circ} = \pi/6) = 5,76$ мм за 1 оборот;

$s_2(\varphi = 60^{\circ} = \pi/3) = 11,52$ мм/об; $\quad s_3(\varphi = 90^{\circ} = \pi/2) = 17,25$ мм/об;

2) путь трения за 1 минуту или за 450 об/мин;

$s_1(0) = 0$;

$s_2(30^{\circ}) = 2,6 \cdot 10^3$ мм/мин; $\quad s_2 = 1,56 \cdot 10^5$ мм/час;

$s_3(60^{\circ}) = 5,2 \cdot 10^3$ мм/мин; $\quad s_3 = 3,12 \cdot 10^5$ мм/час;

$s_4(90^{\circ}) = 7,8 \cdot 10^3$ мм/мин; $\quad s_4 = 4,68 \cdot 10^5$ мм/час;

3) с учетом этого пути составим итоговую таблицу 5.2

Таблица 5.2

Зависимость износа от пути трения и координаты точки

t, час	90	60	30	0	30	60	90
	7	6	5	1	2	3	4
10	$\frac{0,0}{46,8}$	$\frac{0,01}{21,20}$	$\frac{0,02}{10,56}$	$\frac{0,01}{0}$	$\frac{0,03}{10,56}$	$\frac{0,01}{31,20}$	$\frac{0}{46,8}$
20	$\frac{0,0}{93,6}$	$\frac{0,02}{62,40}$	$\frac{0,04}{21,12}$	$\frac{0,02}{0}$	$\frac{0,05}{21,12}$	$\frac{0,02}{62,40}$	$\frac{0}{93,6}$
30	$\frac{0,01}{140,4}$	$\frac{0,03}{93,6}$	$\frac{0,05}{31,68}$	$\frac{0,03}{0}$	$\frac{0,06}{31,68}$	$\frac{0,03}{93,6}$	$\frac{0,01}{140,4}$
40	$\frac{0,01}{187,2}$	$\frac{0,04}{124,8}$	$\frac{0,06}{42,24}$	$\frac{0,03}{0}$	$\frac{0,07}{42,24}$	$\frac{0,04}{124,8}$	$\frac{0,01}{187,2}$
50	$\frac{0,01}{234}$	$\frac{0,05}{156,0}$	$\frac{0,07}{52,8}$	$\frac{0,04}{0}$	$\frac{0,08}{52,8}$	$\frac{0,05}{156,0}$	$\frac{0,02}{234}$
60	$\frac{0,02}{281}$	$\frac{0,06}{187,2}$	$\frac{0,08}{63,36}$	$\frac{0,04}{0}$	$\frac{0,09}{63,36}$	$\frac{0,06}{187,2}$	$\frac{0,02}{281}$
0	$\frac{0,02}{227,6}$	$\frac{0,07}{218,4}$	$\frac{0,09}{73,92}$	$\frac{0,05}{0}$	$\frac{0,10}{73,92}$	$\frac{0,07}{218,4}$	$\frac{0,02}{227,6}$
σ_0, кг/мм^2	0	0,0235	0,0337	0,0447	0,0337	0,0235	0

3) определение максимального давления абразива в характерных точках по формуле (3.4)

$$\sigma(\varphi) = \sigma_0 \cos\varphi = 1,273\sigma_{cp} \cos\varphi = 1,273 \frac{Q}{2Rl} \cos\varphi, \tag{5.2}$$

$$\sigma(\varphi) = 1,273 \frac{Q}{2Rl} \cos\varphi,$$

при $Q = 19,7$ кг (п. 2.2)

$$R = 11, \ l = 20;$$

$$\sigma(\varphi) = \frac{19,7}{2 \cdot 11 \cdot 20} \cdot 1,273 \cos\varphi = 0,0447 \cdot \cos\varphi, \qquad (5.3)$$

3) $\varphi = 30^\circ, \ \sigma(\varphi) = 0,0387$ кг/мм^2;

$\varphi = 60^\circ, \ \sigma(\varphi) = 0,02235$ кг/мм^2;

$\varphi = 90^\circ, \ \sigma(\varphi) = 0,0447$ кг/мм^2.

5.3. Определение параметра k_w

1) для модели (4.4). (4.2)

$$k_w = \frac{u_w}{\sigma s}, \qquad (5.4)$$

2) по таблице 5.2 берем точку 3 с координатой $\varphi = 60^\circ$ при работе 70 часов

$u_w = 0,07$ мм;

$\sigma = 0,0235$ кг/мм^2;

$s = 218,4 \cdot 10^3$ мм;

3) $k_w = \dfrac{0,07}{0,0235 \cdot 218,4 \cdot 10^3} = 0,00112 \cdot 10^{-3}$,

$k_w = 0,1 \cdot 10^{-5}$ мм^2/кг.

5.4. Определение параметров k_w, m по модели (4.5)

1) Для расчетов выбираем базовые точки

$2_1 \varphi_2 = 30^\circ \quad \sigma_2 = 0,007$кг/мм^2 $\quad s_1 = 73,9 \cdot 10^3$мм $\quad u_{w2} = 0,1$мм

$3_1 \varphi_3 = 60^\circ \quad \sigma_3 = 0,0235$кг/мм^2 $\quad s_2 = 218,4 \cdot 10^3$мм $\quad u_{w3} = 0,07$мм

2) $$m = \frac{\lg \frac{u_{w2}}{u_{w3}}}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_3}} - 1 = \frac{\lg \frac{0,1}{0,07}}{\lg \frac{0,0337}{0,0235}} = \frac{0,155}{1,156} = 0,994;$$

3) параметр k_w по (4.9)

$$k_w = \frac{u_{w1}}{\sigma_1^m s_1} = \frac{0,1}{0,0337^{0,994} \cdot 73,92 \cdot 10^3} = 0,004 \cdot 10^{-3},$$

$k_w = 0,4 \cdot 10^{-5}$ мм^2/кг.

6. Практический пример 2 испытаний на абразивный износ по схеме MWU

6.1. Влияние зернистости на абразивный износ. Задача и общий ход ее выполнения

1^0. Цель этой части испытаний состоит в том, чтобы получить обобщенную зависимость абразивного износа по схеме MWU с учетом размера абразивного зерна δ.

1) в общем виде зависимость интенсивности от всех факторов, включая размер абразивных частиц предложена в форме (2.7)

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \left(\frac{\sigma}{HB}\right)^m \left(\frac{v\delta}{v_0}\right)^n \varepsilon^k; \qquad (6.1)$$

2) сохраняя все факторы кроме σ и δ базовыми имеем частный случай этой зависимости в форме

$$\frac{du_w}{ds} = k_w \sigma^m \delta^n , \tag{6.2}$$

при этом HB_δ, v_δ, $v_{0\delta}$, ε_δ .

3) в интегральной форме имеет вид

$$u_w = k_w \sigma^m \delta^n s ; \tag{6.3}$$

4) для определения трех параметров модели k_w, m, δ необходимо иметь три базовых точки на пространстве экспериментальных точек

$$\begin{aligned} &u_{w1}(\sigma_1,\, \delta_1,\, s_1) \\ &u_{w2}(\sigma_2,\, \delta_2,\, s_2) \\ &u_{w3}(\sigma_3,\, \delta_3,\, s_3) \end{aligned} \tag{6.4}$$

5) запишем модель (6.4) для этих трех точек (6.4)

$$\left.\begin{aligned} u_{w1} &= k_w \sigma_1^m \delta_1^n s_1 , \\ k_{w2} &= k_w \sigma_2^m \delta_2^n s_2 , \\ k_{w3} &= k_w \sigma_3^m \delta_3^n s_3 , \end{aligned}\right\} \tag{6.5}$$

6) взяв непарные отношения уравнений, получаем

$$\left.\begin{aligned} \frac{u_{w1}}{u_{w2}} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^m \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right) \frac{s_1}{s_2} \\ \frac{u_{w2}}{u_{w3}} &= \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{23}}\right)^m \left(\frac{\delta_2}{\delta_3}\right) \frac{s_2}{s_3} \end{aligned}\right\}; \tag{6.6}$$

7) решая эту систему уравнений относительно параметров m, n , имеем

$$\left.\begin{aligned} \lg\frac{u_{w1}}{u_{w2}} &= m\lg(\sigma_1/\sigma_2) + n\lg\delta_1/\delta_2 + \lg s_1/s_2 \\ \lg\frac{u_{w2}}{u_{w3}} &= m\lg(\sigma_2/\sigma_3) + n\lg\delta_2/\delta_3 + \lg s_2/s_3 \end{aligned}\right\}; \tag{6.7}$$

8) решая систему 7 имеем

$$m\lg(\sigma_1/\sigma_2) = n\lg(\delta_1/\delta_2) + \lg(s_1/s_2) - \lg(u_{w1}/u_{w2}) ,$$

$$m\lg(\sigma_2/\sigma_3) = n\lg(\delta_2/\delta_3) + \lg(s_2/s_3) - \lg(u_{w2}/u_{w3}) ,$$

9) $$n = \frac{\lg\delta_1/\delta_2}{\lg\delta_2/\delta_3} = \frac{\lg\sigma_1/\sigma_2 + \lg u_{w1}/u_{w2} - \lg s_1/s_2}{\lg\sigma_2/\sigma_3 + \lg u_{w2}/u_{w3} - \lg s_2/s_3} .$$

10) отсюда имеем

$$n = \frac{\dfrac{\lg\sigma_1/\sigma_2 + \lg u_{w1}/u_{w2} - \lg s_1/s_2}{\lg\sigma_2/\sigma_3 + \lg u_{w2}/u_{w3} - \lg s_2/s_3}}{\lg(\delta_1/\delta_2)/\lg(\delta_2/\delta_3)} ; \tag{6.8}$$

11) параметр m найдем на пример из первого уравнения (6.7)

$$m = \frac{\lg u_{w1}/u_{w2} - \mathrm{g}\,\sigma_1/\sigma_2 - \lg s_1/s_2}{\lg\sigma_1/\sigma_2} ; \tag{6.9}$$

12) параметр k_w определяется из (6.5)

$$k_w = \frac{u_{w1}}{\sigma_1^m \delta_1^n s_1} . \tag{6.10}$$

6.2. Метод наращивания модели и его применение

1^0. Сущность метода наращивания модели покажем на примере определения параметров модели (6.1):

1) пример прямого определения трех параметров k_w, m, n модели показан в п. 6.1.

Из этого примера следует громоздкий характер промежуточных преобразований и конечного результата;

2) идея метода наращивания модели состоит в последовательном сведении задачи построения полной модели с многими (3-5) параметрами к задаче построения модели с двумя параметрами;

3) при реализации метода наращивания модели принимается, что степенные параметры модели, полученные при учете двух первых факторов остаются справедливыми при добавке к модели третьего фактора и так далее увеличивая число факторов.

2^0. Пример применения метода наращивания модели

1) Пусть в модели (6.2) выполнено определение параметров k_w и m_σ при учете двух факторов σ и s ;

$$u_w = k_{w\sigma}\sigma^{m\sigma}s\ ; \tag{6.9}$$

2) полагаем, что параметр m_σ остается быть справедливым в случае, если выполняется эксперименты для определения величины параметра n учета влияния размера абразива δ ;

3) тогда модель (6.2) приводится к виду

$$u_w = k_{w\delta}\sigma^{m\sigma}\delta^{n\delta}s\ , \tag{6.8}$$

где неизвестными параметрами модели являются два параметра $k_{w\delta}$ и n_δ ;

4) проводя опыты при заданных давлениях σ и известной величине m_σ имеем сведение задаче к модели с двумя неизвестными параметров $k_{w\delta}$ и n_δ

$$u_w = k_{w\delta}c_\sigma\delta^{n\delta}s\ , \tag{6.9}$$

где $c_\sigma = \sigma^{m_\sigma}$ – задано, точнее известно;

5) или представляя (6.9) в виде

$$u_w = \overline{k_{w\delta}}\delta^{n\delta}s\ , \tag{6.10}$$

где

$$\overline{k_{w\delta}} = k_{w\delta}c_\sigma\ ; \tag{6.11}$$

6) процедура определения двух параметров $k_{w\delta}$ и n_δ соответствует процедуре, описанной в п. 4.4;

7) выбрав из множества экспериментальных данных с изменяемы размером частиц δ две точки $(u_{w1},\ \delta_1,\ s_1)$ и $(u_{w2},\ \delta_2,\ s_2)$, имеем:

$$\left.\begin{aligned} u_{w1} &= k_{w\delta}c_\sigma\delta_1^{n\delta}s_1 \\ u_{w2} &= k_{w\delta}c_\sigma\delta_2^{n\delta}s_2 \end{aligned}\right\}, \tag{6.10}$$

или

$$\left.\begin{aligned} u_{w1} &= \overline{k_{w\delta}}\delta_1^{n\delta}s_1 \\ u_{w2} &= \overline{k_{w\delta}}\delta_2^{n\delta}s_2 \end{aligned}\right\}; \tag{6.11}$$

8) решая эту систему, получаем уравнение

$$\frac{u_{w1}}{u_{w2}} = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^{n_\delta}\frac{s_1}{s_2}\ , \tag{6.12}$$

отсюда

$$n_\delta = \frac{\lg u_{w1}/u_{w2} - \lg s_1/s_2}{\lg(\delta_1/\delta_2)}\ ; \tag{6.13}$$

9) второй параметр $k_{w\delta}$ модели (6.8) определяем из первого уравнения (6.10) или (6.11)

$$k_{w\delta} = \frac{u_{w1}}{c_\sigma\delta_1^{n\delta}s_1}\ . \tag{6.14}$$

6.3. Реализация метода наращивания модели

1^0. Условия испытаний на абразивный износ по схеме MWU в этом практическом:

1) в примере № 2 в основном соответствует условиям, принятым в примере № 1 п. 5.1;

2) в отличие от примера 1 в примере 2 испытания приведены с песком, состоящим из абразивных части со средними размерами $\delta = 0,63$ мм – 1 мм; $\delta_{cp} = 0,8$ мм.

2^0. Результаты испытаний латунных образов

1) в примере № 2 приведены в таблице 6.1 и на рис. 6.1.

2) результаты испытаний в форме зависимостей износа (в абразиве $\delta = 0,63 - 1$ мм) от пути трения и координаты точки поверхности трения приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.1

Результаты испытаний на износ в песке с размерами частиц $\delta = 0,63 - 1$ мм

		1	2	3	4	5	6	7
	10	0,01	0,03	0,03	0	0,02	0,01	0
	20	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0
	30	0,01	0,05	0,01	0	0,03	0	0,01
	40	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0
	50	0,01	0,02	0,01	0	0,02	0,01	0,01
	60	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0
	70	0,01	0,03	0,01	0	0,02	0,01	0
	Итого	0,08	0,19	0,11	0,03	0,15	0,08	0,02

Таблица 6.2

Зависимость износа от пути трения и координаты точки для образцов $\delta = 0,63 - 1$ мм

φ	90	60	30	0°	30	60	90
t, час	7	6	5	1	2	3	4
10	$\frac{0,0}{46,8}$	$\frac{0,01}{21,20}$	$\frac{0,02}{10,56}$	$\frac{0,01}{0}$	$\frac{0,03}{10,56}$	$\frac{0,03}{21,20}$	$\frac{0}{46,8}$
20	$\frac{0,0}{93,6}$	$\frac{0,03}{62,40}$	$\frac{0,04}{21,12}$	$\frac{0,02}{0}$	$\frac{0,05}{21,12}$	$\frac{0,05}{62,40}$	$\frac{0,01}{93,6}$
30	$\frac{0,01}{140,4}$	$\frac{0,03}{93,6}$	$\frac{0,07}{31,68}$	$\frac{0,03}{0}$	$\frac{0,10}{31,68}$	$\frac{0,06}{93,6}$	$\frac{0,01}{140,4}$
40	$\frac{0,01}{187,2}$	$\frac{0,05}{124,8}$	$\frac{0,09}{42,24}$	$\frac{0,05}{0}$	$\frac{0,12}{42,24}$	$\frac{0,08}{124,8}$	$\frac{0,02}{187,2}$
50	$\frac{0,02}{234}$	$\frac{0,06}{156,0}$	$\frac{0,11}{52,8}$	$\frac{0,06}{0}$	$\frac{0,14}{52,8}$	$\frac{0,09}{156,0}$	$\frac{0,02}{234}$
60	$\frac{0,02}{281}$	$\frac{0,07}{187,2}$	$\frac{0,13}{63,36}$	$\frac{0,07}{0}$	$\frac{0,16}{63,36}$	$\frac{0,10}{187,2}$	$\frac{0,03}{281}$
70	$\frac{0,02}{227,6}$	$\frac{0,08}{218,4}$	$\frac{0,15}{73,92}$	$\frac{0,08}{0}$	$\frac{0,19}{73,92}$	$\frac{0,11}{218,4}$	$\frac{0,03}{227,6}$
L_Σ	0,02	0,8	0,15	0,08	0,19	0,11	0,03
σ_0, кг/мм^2	0	0,0235	0,0337	0,0447	0,0337	0,0235	0

9^0. Определение параметров модели абразивного износа

1) для определения параметра n_δ возьмем из множества данных две точки с координатами (из таблицы 5.2, 6.2)

$$(u_{w1},\, s_1,\, \delta_1), \qquad (u_{w2},\, s_2,\, \delta_2)\,; \tag{6.14}$$

2) пользуясь данными таблицы 6.2 принимаем

$$s_1(60^\circ)t = 70\text{часов} = 218,4\text{мм}\cdot 10^3, \qquad \delta_1 = 0,25\ \text{мм};$$

$$s_2(30^\circ)t = 70\text{часов} = 73,92\text{мм}, \qquad \delta_2 = 0,8\ \text{мм};$$

$$u_{w2} = 0,19\ \text{мм};$$

3) вычисления выполним по формуле (6.13)

$$n_\delta = \frac{\lg u_{w1} / u_{w2} - \lg s_1 / s_2}{\lg \delta_1 / \delta_2}, \tag{6.15}$$

$$n_\delta = \frac{\lg(0,0 / 0,19) - \lg(218,4 / 73,92)}{\lg(0,25 / 0,8)};$$

$$n_\delta = \frac{-0,435 - 0,47}{-0,505} = \frac{0,905}{0,505} = 1,792\,;$$

4) второй параметр модели изнашивания (6.8) определяется по формуле (6.14)

$$k_{w\delta} = \frac{u_{w1}}{c_\sigma \delta_1^{n\delta} s_1}; \tag{6.16}$$

5)при $u_{w1} = 0,07$ мм; $s_1 = 218,4 \cdot 10^3$ мм; $\delta_1 = 0,25$ мм;

$$c_\sigma = \sigma_1^{m\sigma} \simeq \sigma_1, \tag{6.17}$$

$\sigma_1 = 0,0235$ кг/мм^2 по таблице 6.2

$$m_\sigma = 1$$

6) $$k_{w\delta} = \frac{0,07}{0,0235 \cdot 0,25^{1,792} \cdot 218,4 \cdot 10^3} = 27,35 \cdot 10^{-3} \text{ мм/кг.}$$

Выводы

1. Среди множества известных методов испытаний на абразивный износ метод Малышева-Веллингера-Уэтца (MWU) получил широкое распространение и в ряде стран США, Великобритания, Германия, Россия и других метод стандартизован.

2. В общепринятой форме метод MWU носит качественный характер: ввиду отсутствия математических моделей процесса затруднено:

1) распространение получаемых результатов на другие условия и;

2) обоснованное сравнение износостойкости разных материалов, испытанных по этому методу.

3. В данной работе, прежде всего, методом ТПР выполнено построение однофакторной обобщенной модели абразивного изнашивания образцов в абразивной смеси по схеме MWU.

4. Выполнен силовой и кинематический анализ режимов работы установки по схеме MWU.

В результате определены основные характеристики условий абразивного изнашивания: $Q-$силы действующие на цилиндры от песка; $\sigma-$давления, возникающие на цилиндре; $s-$путь трения и $v-$скорость для изнашиваемых точек.

5. Введено понятие вязкости абразивной среды, предложен и реализован способ определения вязкости абразивной среды (в частности песка).

6. Разработаны теоретические основы метода определения параметров модели изнашивания, включающие решение прямых и обратных контактных задач о взаимодействии цилиндра и смеси с учетом абразивного износа по предложенной модели.

7. Разработана методика испытаний на абразивный износ по схеме MWU включающая:

1) установку для испытаний;

2) метод измерения линейного износа цилиндра;

3) оценку мощности, расходуемой в процессе изнашивания;

4) порядок проведения испытаний;

5) порядок обработки результатов испытаний с определением: а) количественных характеристик процесса; б) с определением параметров безразмерной обобщенной модели изнашивания.

8. Реализована предложенная методика испытаний на примере абразивного износа латунного образца.

9. Полученные в результате испытаний параметра обобщенной модели абразивного изнашивания позволяют с помощью критериального уравнения определить износ материала с учетом твердости, скорости, дискретности смеси, вязкости смеси.

10. Разработанный метод может быть рекомендован для модифицирования известных стандартов по испытаниям по схеме MWU.

Надійшла 2.4.2011 р.