DOI: 10.17117/nv.2014.01.090

Поступило в редакцию: 19.11.2014

<http://ucom.ru/doc/nv.2014.01.090.pdf>

vtupost@yandex.ru

Кравченко И.Н., Салаев Н.И., Салаев С.И., Бумарсков Д.А. Модель взаимодействия рабочих агрегатов смесительного оборудования с абразивной средой при ударных нагрузках

**Kravchenko I.N., Salaev N.I., Salaev S.I., Bumarskov D.A.
Model of interaction operating units mixing equipment
abrasive media and shock loads**

В данной работе предложены физико-механические модели взаимодействия рабочих органов смесительного оборудования различных конструкций с ударно-абразивной средой

Ключевые слова: скорость частиц, ударно-абразивное изнашивание абразивные частицы, ударно-абразивная среда

In this paper we construct physical-mechanical model of interaction of working bodies of mixing equipment with shock – abrasive media

Key words: particle velocity, impact-abrasion abrasive particles, shock-abrasive media

Кравченко Игорь Николаевич

Доктор технических наук, профессор
Военно-технический университет
Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, 8

Kravchenko Igor Nikolaevich

Doctor of Engineering Sciences, Professor
Military Technical University
Moscow region, Balashikha, Karbysheva St., 8

Салаев Николай Иванович

Аспирант, Ведущий инженер ПТО ООО
«Мосстроймонтаж»
Военно-технический университет
г. Москва, Лужнецкая набережная, 2/4

Salaev Nikolai Ivanovich

graduate, Leading engineer of LLC "Ostroumova"
Military Technical University
Moscow, Luzhnetskaya embankment, 2/4

Салаев Сергей Иванович

Аспирант, Нач. ПТО ООО «Мосстроймонтаж»
Военно-технический университет
г. Москва, Лужнецкая набережная, 2/4

Salaev Sergei Ivanovich

Graduate, Beg. VET LLC Ostroumova"
Military Technical University
Moscow, Luzhnetskaya embankment, 2/4

Бумарсков Дмитрий Александрович

аспирант
Военно-технический университет
г. Москва, Лужнецкая набережная, 2/4

Bumarskov Dmitry Aleksandrovich

graduate
Military-Technical University
Moscow, Luzhnetskaya embankment, 2/4

В процессе приготовления растворов, кроме абразивного воздействия от мелких фракций, происходит ударное воздействие от крупных фракций. В зависимости от формы зерен устанавливается три группы щебня из естественного камня (кубовидная, улучшенная и обычная), а также зерна пластинчатой (лещадной) и игловатой форм (содержание не превышает соответственно

15-35% по массе). Под их воздействием и происходит ударно-абразивное изнашивание.

Рассмотрим физические процессы взаимодействия спиралеобразных лопаток лотковых одновальных смесителей отечественного производства (БСМ 26-0,5) и зарубежных аналогов («ELBA») с рабочей (ударно-абразивной) средой. В результате перемешивания бетонорастворной смеси основная масса крупных фракций концентрируется в центре смесителя и под действием силы тяжести F_T оседает на дно емкости (рис. 1). Этот процесс является циклическим [1], поэтому основной износ поверхности происходит тогда, когда рабочий орган проходит нижнюю часть смесителя.

Рис. 1. Схема движения потока раствора и частиц крупных фракций

Величины сил, действующие на рабочий орган смесителя (рис. 2), определяются следующими выражениями:

$$dF_1 = dF \cos \gamma, dF_2 = dF \sin \gamma; \quad (1)$$

$$dF_3 = dF \cos \alpha \cdot \cos \gamma, dF_4 = dF \sin \alpha \cdot \cos \gamma; \quad (2)$$

$$\frac{dF}{dt} = 2mV \cdot \cos \gamma; \quad dF = 2mV \cdot \cos \gamma \cdot dt. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что воздействующие силы зависят от векторной суммы скоростей лопасти и абразива V и угла ее наклона γ , а соответственно и подводимая частицей энергия, количество которой и будет устанавливать характер процесса съема металла с поверхности рабочего органа [2, 3].

Если динамическую модель взаимодействия тел строить относительно какой-либо точки на поверхности лопасти (лопатки), то подводимая энергия рассчитывается следующим образом:

$$E = \frac{mV^2}{2} = \frac{m(\vec{z} + \vec{u})^2}{2}, \quad (4)$$

где m – масса абразивной частицы, кг;

V – векторная сумма скоростей абразивной частицы и лопасти, м/с;

$\vec{z}$ – вектор скорости точки на плоскости лопасти, м/с;

$\vec{u}$ – вектор средней скорости абразивной частицы, м/с.

Рис. 2. Схема действия сил на рабочий орган смесителя (БСМ 26-0,5)

а) схема лопасти; б) многоугольник сил; dF_1 – усилие, направленное параллельно оси вала смесителя (составляющая усилия dF); dF_2 – усилие, направленное перпендикулярно оси вала (радиальная сила, составляющая усилия dF); dF_3 – аксиальное усилие (составляющая усилия dF_1); dF_4 – окружное усилие (составляющая dF_1); V – результирующая скорость (векторная сумма скоростей лопасти и абразива)

Расчет модуля средней скорости абразивной частицы, учитывая множество сопутствующих динамических процессов взаимодействия даже при упрощенной системе моделирования произвести невозможно. Данная задача решена с помощью теории подобия и размерности, в частности, Π – теоремы Бэкингема [4, 6].

Закономерности того или иного физического явления описываются определяющим уравнением, связывающим между собой величины, существенные для процесса (уравнения связи) и характерные для механики жидкости и газа.

Течение каждого процесса характеризуется определенным числом физических параметров первой и второй группы ($X_1, X_2, X_3 \dots X_i$), размерности которых могут быть выражены через k базовых единиц измерения, так что $i > k$. Все остальные в количестве $(i - 1)$, будучи независимыми переменными, являются аргументами, из которых komponуются определяющие числа подобия. Их количество в силу независимости действия различных факторов должно быть равно числу физических явлений, сопровождающих данный процесс.

Среди определяющих параметров в количестве $(i - 1)$ имеются такие, при отсутствии которых не могут произойти сами физические явления. Они составляют главную причину происходящего, и потому эти параметры и их размерности являются первопричинными. Число первопричинных аргументов m_0 должно быть равно общему количеству определяющих параметров $(i - 1)$ за вычетом базовых размерностей, характерных для данного процесса, т.е. $m_0 = i - k - 1$. Тогда общее число безразмерных комплексов, характеризующих процесс, составит $m = m_0 + 1 = i - k$.

В данной системе моделирования для отражения процесса движения частицы абразива достаточно следующих семи параметров ($i = 7$): d – средний диаметр частиц; ρ – средняя плотность смеси; ρ_t – плотность материала частицы; a – ускорение движения частицы; u_0 – начальная скорость частицы; η – вязкость смеси; l – пройденный частицей путь. Тогда можно записать:

$$f(u_0, d, \rho, a, \rho\tau, \eta, l) = 0. (5)$$

Выпишем размерности величин, входящих в это соотношение:

$$[\rho] = ML^{-3}; [l] = L; [d] = L; [u] = L\tau^{-1}; [\eta] = ML^{-1}\tau^{-1}; [a] = L\tau^{-2}, \quad (6)$$

где М – масса;

L – расстояние;

τ – время.

Из этого следует, что минимальное число первичных размерностей, из которых образованы все остальные, равно трем (размерности массы, длины и времени). Поэтому в данном случае число безразмерных параметров, характеризующих явление, составит $m = (7 - 3) = 4$.

В соответствии с выражением (5) запишем произведение степеней параметров, наложив на него условие нулевой размерности:

$$\Pi = u_0^{n_1} d^{n_2} (\rho_m - \rho)^{n_3} a^{n_4} \rho^{n_5} \eta^{n_6} l^{n_7} = M^0 L^0 \tau^0. \quad (7)$$

Подставив вместо параметров их размерности (6)

$$\Pi = (L\tau^{-1})^{n_1} (L)^{n_2} (ML^{-3})^{n_3} (L\tau^{-2})^{n_4} (ML^{-3})^{n_5} (ML^{-1}\tau^{-2})^{n_6} (L)^{n_7} = M^0 L^0 \tau^0,$$

получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} n_1 + n_2 - 3n_3 + n_4 - 3n_5 - n_6 + n_7 &= 0 \\ n_3 + n_5 + n_6 &= 0 \\ n_1 + 2n_2 + n_6 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Решая эту систему относительно n_3, n_4, n_5 , находим

$$n_1 = -2n_4 - n_6; n_2 = n_4 - n_6 - n_7; n_5 = -n_3 - n_6$$

Следовательно, имеем:

$$\Pi = u_0^{-2n_4-n_6} d^{n_4-n_6-n_7} (\rho_m - \rho)^{n_3} a^{n_4} \rho^{-n_3-n_6} \eta^{n_6} l^{n_7} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{n_3} \left(\frac{1}{adu_0} \right)^{n_4} \left(\frac{\eta}{du_0\rho} \right)^{n_6} \left(\frac{l}{d} \right)^{n_7}. \quad (9)$$

Числа n_3, n_4, n_6 , будучи выражены через остаток, могут быть исключены из расчета:

$$\left. \begin{aligned} -3n_3 + n_4 - n_6 + n_7 &= 0 \\ n_3 + n_6 &= 0 \\ 2n_2 + n_6 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Решая систему уравнений (10) относительно n_3 , находим

$$n_6 = -n_3; n_4 = \frac{n_3}{2}; n_7 = \frac{3n_3}{2}.$$

Тогда уравнение (9) примет вид:

$$\Pi = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{n_3} \left(\frac{1}{adu_0} \right)^{\frac{n_3}{2}} \left(\frac{\eta}{du_0\rho} \right)^{-n_3} \left(\frac{l}{d} \right)^{\frac{3}{2}n_3} = \frac{\Delta\rho}{\eta} \sqrt{\frac{l}{ad^2}}. \quad (11)$$

Отсюда получаем зависимость ускорения от остальных параметров:

$$a = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\eta d}} l^{\frac{3}{2}}. \quad (12)$$

В процессе перемешивания поток, которому лопасти (в пространстве, в котором лежат плоскости ограниченной длины спирали l) сообщают начальную скорость u_0 , в среднем проходят расстояние l . Поэтому условно за среднюю скорость частицы в потоке примем скорость u_{cp} , с которой движется частица в конце пути ΔS в точке A (рис. 3).

Рис. 3. Схема движения частицы при перемешивании

Учитывая, что в данном случае $u = u_0 - at$, $t = v / 60$, то

$$u_{cp} = \frac{l}{216} \left(60^2 - v \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\eta d l^{1/2}}} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (13)$$

где v – частота вращения вала смесителя, с⁻¹.

Анализ выражения (13) позволяет наглядно отобразить зависимость скорости частиц от их размера и плотности материала (рис. 4). При этом частота вращения вала ($v = 25$ с⁻¹), длина спирали ($l = 0,73$ м), плотность ($\rho = 1,5$ кг/м³) и вязкость ($\eta = 4 \times 10^6$ Па·с) перемешиваемого раствора приняты за постоянные величины.

На основании вышеизложенного следует, что скорость частиц в потоке раствора при перемешивании возрастает с увеличением размера и уменьшается с увеличением плотности материала. Это объясняется тем, что кинетической энергии частиц из более плотного материала, сообщаемой лопастью, для преодоления силы тяжести и сопротивления потоку недостаточно, поэтому такие абразивные частицы перемещаются по дну смесителя. В свою очередь менее плотные частицы независимо от их размера движутся вместе с потоком, активно взаимодействуя с поверхностью лопастей.

Несмотря на то, что тяжелые частицы при взаимодействии с плоской поверхностью лопастей (лопаток) смесителя не передают достаточной энергии для их разрушения [5], можно предположить, что они являются основной причиной износа ее торцевой поверхности.

Рис. 4 Зависимость скорости частиц от их размера и плотности материала

Принимая за среднюю скорость движения частиц усредненную величину по диаметру и плотности материала, снизив на 30 %, за счет упрощенной модели и погрешности, найдем суммарную скорость в момент их взаимодействия с поверхностью лопастей:

$$V = z \cdot u_{cp} \cdot \cos(\beta + \gamma); \quad (14)$$

$$z = v_p \cdot v_l \cdot \cos(90 + \alpha); \quad v_p = \frac{2\pi R 60}{v}; \quad v_l = \frac{l \cdot 60}{v}, \quad (15)$$

где v_p , v_l – соответственно радиальная и линейная скорости точки на плоскости лопастей;

u_{cp} – скорость частицы ($u_{cp} = 1,13$ м/с);

α – угол наклона лопасти ($\alpha = 35^\circ$);

β – угол атаки абразивной частицы;

γ – угол наклона результирующей скорости к плоскости лопасти;

R – средний радиус спирали, определяемый как среднее арифметическое между внутренним и средним радиусами ($R = 0,49$ м).

Выразим угол γ через косинус угла α :

$$\gamma = \arccos\left(\frac{v_p \cdot \cos \alpha}{V}\right) + \alpha = \arccos\left(\frac{v \cos \alpha}{60 \cdot l \cdot \cos(90 + \alpha)}\right) + \alpha. \quad (16)$$

Подставив выражения (15) и (16) в уравнение (14), получим:

$$V = u_{cp} \cdot 2\pi R \left(\frac{60}{v}\right)^2 \cos\left(\beta + \alpha + \arccos\left(\frac{v \cdot \cos \alpha}{60 \cdot l}\right)\right). \quad (17)$$

На основании уравнения (4), принимая $m = \text{const}$, результаты приведенных расчетов (табл. 1) позволили построить зависимость подводимой энергии от угла атаки абразивной частицей.

Таблица 1. Изменение подводимой энергии в момент соударения частицы с лопаткой от угла ее атаки при $\alpha = 35^\circ$

β_0	1	4	7	10	13	16
Е, Дж	5,224783	7,894477	11,0619	14,69234	18,74602	23,17854
β_0	19	22	25	28	31	34
Е, Дж	27,94133	32,98221	38,24594	43,67486	49,20949	54,78918
β_0	37	40	43	46	49	52
Е, Дж	60,35281	65,83943	71,18891	76,34264	81,24417	85,83979
β_0	55	58	61	64	67	70
Е, Дж	90,07915	93,9158	97,30771	100,2177	102,6139	104,4701
β_0	73	76	79	82	85	88
Е, Дж	105,7659	106,4871	106,6258	106,1806	105,1562	103,5639
β_0	91	94	97	100	103	106
Е, Дж	101,4212	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709
β_0	109	112	115	118	121	124
Е, Дж	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709
β_0	127	130	133	136	139	142
Е, Дж	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709
β_0	145	148	151	154	157	160
Е, Дж	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709	4,450709

Тепловую энергию Γ при ударе с частицей заполнителя можно выразить следующим образом:

$$E = \Gamma + E_k; \Gamma = e + \lambda \cdot M, \quad (18)$$

где e – тепловая энергия, перешедшая в рабочую среду, Дж;

λ – теплоемкость плавления металла лопасти, Дж/кг ($\lambda = 84$ кДж/кг);

M – масса металла на микро участке, которая подверглась нагреву, кг;

E_k – кинетическая энергия отскока частицы, которую можно найти из следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} V &= V_2 + \Gamma \\ E &= \Gamma + \frac{V_2^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где V_2 – скорость отскока частицы, м/с.

Решая систему уравнений (19) относительно V_2 , получим:

$$V_2 = 1 - \sqrt{\frac{1}{4} + 2E - V}; E_k = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} + 2E - V}\right)^2}{2}. \quad (20)$$

В среднем теплопроводность каменного материала (включая песок и цемент) на микроуровне будет равна теплопроводности воды [7]. Тогда за единицу времени сталь возьмет 76 % тепла, а остальные 24 % уйдут в рабочую среду.

Результаты анализа показывают, что максимальная энергия ($E = 106,63$ Дж) будет подводиться при угле атаки относительно лопасти $\beta = 79^\circ$. Соответствующая этим параметрам сумма скоростей частиц в зависимости от угла атаки в момент соударения составит порядка $V = 14,6$ м/с (рис. 5).

Тогда масса выплавляемого металла для этих условий составит:

$$M = \frac{0,76 \left(E - \left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} + 2E - V} \right)^2 \right)}{\lambda} = \frac{0,76 \left(106,63 - \left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} + 2 \cdot 106,63 - 14,6} \right)^2 \right)}{84} \approx 0,19 \text{ г.}$$

При средней плотности стали $\rho = 7400 \text{ кг/м}^3$ можно найти средний объем выплавления металла:

$$T = \frac{0,19}{74 \cdot 10^5} = 2,56 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 = 25,3 \text{ мм}^3.$$

Следовательно, при ударе термическому воздействию будет подвержен участок средней площадью 9 мм на глубину 2,8 мм, в результате чего происходит отпуск металла у поверхности этого участка.

Материал, из которого изготовлена лопасть рабочего органа, становится мягким и при дальнейших соударениях с абразивными частицами снимается (удаляется).

Рис. 6. Зависимость суммарной скорости V от угла атаки частицы β

Таким образом, можно предположить, что процесс выплавления происходит в две стадии: стадия нагрева металла и стадия удаления.

При циклических нагрузках, какие имеют место при ударах абразивных частиц, процесс разрушения и процесс плавления металла одинаково энергоемки. Анализ графика (см. рис. 6) позволяет предположить, что процесс выплавления металла будет происходить при углах атаки, лежащих в интервале от 50° до 90°. В интервале от 95° до 179° будет происходить незначительное царапание металла за счет сонаправленности скоростей частицы и лопатки.

Результаты исследований механизма разрушения при ударно-абразивном изнашивании показывают, что отделение частицы износа определяется, с одной стороны, условиями нагружения, а с другой — структурным со-

стоянием и свойствами изнашиваемых материалов. Поэтому при выборе материалов, подвергающихся ударно-абразивному изнашиванию, значительное внимание необходимо уделять аустенитным сталям.

Заключение.

Установленные причинно-следственные связи возникновения повышенной интенсивности изнашивания позволили разработать физико-механические модели взаимодействия абразивной среды с рабочими органами смесителей, доказывающую, что скорость изменения параметра (скорость изнашивания) зависит как от эксплуатационных факторов, так и от самой структуры рабочих элементов, обуславливающих случайную природу их долговечности.

Список литературы:

1. Кравченко И.Н., Салаяев Н.И., Бумарсков Д.А. Модель изменения параметров технического состояния механического оборудования бетонорастворных комплексов на основе критерия интенсивности износа // Механизация строительства. 2014. № 2. С. 46-47.
2. Кравченко И.Н. Физико-математическая модель отказов быстроизнашивающихся рабочих элементов строительных машин и технологического оборудования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2007. № 10. С. 36-38.
3. Кравченко И.Н. Методика расчета долговечности изнашивающихся деталей машин и технологического оборудования строительной индустрии // Механизация строительства. 2009. № 5. С. 16-19.
4. Кравченко И.Н. Методология обеспечения долговечности рабочих элементов строительных машин и технологического оборудования при возведении объектов специального назначения: дис. д-ра техн. наук. Балашиха, 2009. 353 с.
5. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Ерофеев М.Н. Инженерные методы обеспечения долговечности и надежности машин и технологического оборудования в промышленности. М.: Эко-Пресс, 2011. 424 с.
6. Либовиц Г. Математические основы теории разрушения М.: Мир, 1975. Т. 2. 763 с.
7. Бадьин Г.М., Стебаков В.В. Справочник строителя. М.: АСВ, 2003. 340 с.

References:

1. Kravchenko I.N., Salyaev N.I., Bumarskov D.A. Model change the technical condition of mechanical equipment mix concrete complexes based on the criterion of wear intensity // Mechanization construction. 2014. № 2. Pp. 46-47.
2. Kravchenko I.N. Physical and mathematical model of failures wearing of working elements of construction machinery and technological equipment // Repair. Recovery. Modernization. 2007. № 10. Pp. 36-38.
3. Kravchenko I.N. Method of calculating the durability of wearing parts of machinery and process equipment construction industry // Building equipment. 2009. № 5. Pp. 16-19.
4. Kravchenko I.N. Methodology durability of work items of construction machinery and technological equipment in the construction of special purpose: Dissertation. Balashikha, 2009. 353 p.
5. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Erofeev M.N. Engineering methods to ensure the longevity and reliability of machinery and process equipment in the industry M.: Eco-Press, 2011. 424 p.
6. Liebowitz G. Mathematical foundations of the theory of destruction M: Mir, 1975. Vol. 2. 763 p.
7. Badin G.M., Stebakov V.V. Directory builder. M.: DIA, 2003. 340 p.

© 2014, Кравченко И.Н., Салаяев Н.И., Салаяев С.И., Бумарсков Д.А.

Модель взаимодействия рабочих агрегатов смесительного оборудования с абразивной средой при ударных нагрузках

© 2014, Kravchenko I.N., Salyaev N.I., Salyaev S.I., Bumarskov D.A.

Model of interaction operating units mixing equipment abrasive media and shock loads