

УДК621.921.620.178.16

В.В. Шевеля, В.И. Дворук, А.В. Радченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ ТРИБООЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены особенности построения модели трибоочистки металлических поверхностей с применением статистического метода

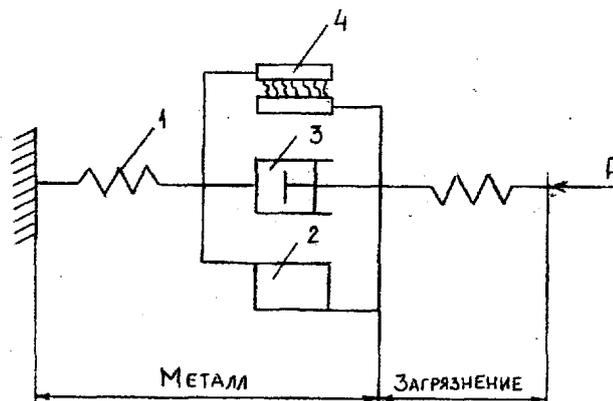
Перед сдачей в эксплуатацию, а также в процессе ее металлические поверхности покрывают краской, полимерами, металлами или другими антикоррозионными веществами. Нанесению покрытия предшествует операция очистки поверхности от коррозии, старых лакокрасочных покрытий, оксидных пленок, окалины и т.д. Наиболее простым и распространенным способом подготовки поверхности под покрытие является абразивная трибоочистка. Этот способ основан на использовании силы трения скольжения, а сущность его заключается в разрушении загрязнения скользящим по поверхности рабочим инструментом (наждачная шкурка, напильник, абразивный брусок, твердосплавный инструмент и т.д.). Для управления процессом трибоочистки и его оптимизации необходимо изучить зависимости между основными технологическими параметрами (усилие очистки, физико-механические свойства металла и загрязнения) и выходной характеристикой (интенсивность очистки). Это связано с необходимостью выбора технологических параметров процесса в условиях конкретной производственной ситуации. Такие зависимости могут быть определены в результате моделирования статистическим методом [1,2]. Реализация указанного подхода предполагает построение математической модели очистки, производимой единичным абразивным зерном, и суммирование независимых очисток, производимых всеми зернами рабочего инструмента. При разработке технологических процессов очистки изделий отмечается [3], что при некоторых режимах очистки разрушается только загрязнение с минимальными потерями основного металла, а при форсированных режимах наблюдаются заметные потери основного металла.

Различие физико-механических свойств загрязнения и основного металла можно выразить в виде реологической модели (рис.1), составленной из элементов Гука, Сен-Венана-Кулона, Ньютона, Релея. Так как загрязнение разрушается хрупко, то оно моделируется только элементом Гука. Анализ модели показывает, что загрязнение как элемент, обладающий ярко выраженным потенциальным барьером, можно разрушить без повреждения основного металла, для которого потенциальный барьер не может быть определен однозначно из-за наличия кинетических компонент, моделируемых элементами Ньютона, Сен-Венана-Кулона и Релея.

В общем случае модель абразивной трибоочистки будет состоять из двух слагаемых: модели разрушения основного металла и модели разрушения загрязнения.

Рис.1. Реологическая модель загрязненной металлической поверхности при абразивной трибоочистке:

- 1- элемент Гука;
- 2- элемент Сен-Венана-Кулона;
- 3- элемент Ньютона;
- 4- элемент Релея



Рассмотрим модель разрушения основного металла. Для оценки напряженного состояния поверхностного слоя основного металла в рассматриваемых условиях выделим две динамические системы (рис.2): локальную 1 и общую 2. Локальная система определяет контактное взаимодействие единичной абразивной частицы с поверхностным слоем. Общая система характеризует опорную поверхность, т.е. определяет число единичных взаимодействий.

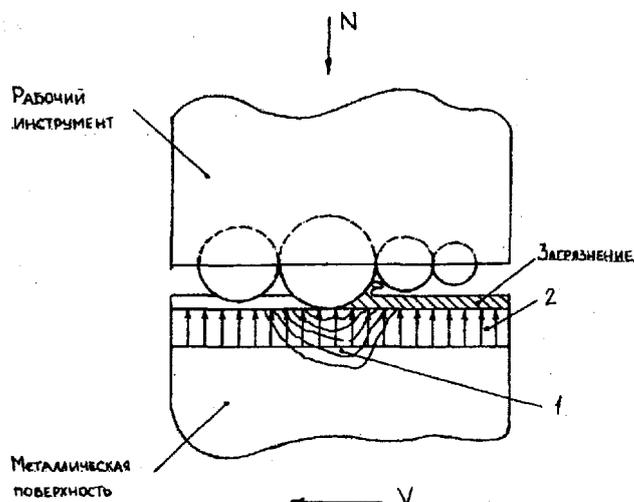


Рис.2. Динамические системы при абразивной трибоочистке металлической поверхности:

1-локальная; 2- общая

При описании разрушения основного металла исходим из того, что число абразивных частиц в контакте постоянно. Это позволяет считать обе системы независимыми и провести их последовательное рассмотрение.

Локальная динамическая система. Форму абразивной частицы будем аппроксимировать сферой (см. рис.2). В механизме внешнего силового воздействия абразивной частицы на поверхность металла при скольжении можно выделить два этапа [4]. Первый этап характеризуется воздействием абразивной частицы на поверхность и завершается внедрением ее в поверхностный слой на некоторую глубину. На втором этапе частица совершает поступательное перемещение вдоль рабочей поверхности, разрушая и деформируя ее.

Нормальная нагрузка N_a на абразивную частицу равна [5]

$$N_a = 2\pi r^2 \varepsilon \sigma_a, \quad (1)$$

где r – радиус абразивной частицы; $\varepsilon = \frac{h_a}{r}$ – относительная глубина внедрения абразивной частицы; h_a – глубина внедрения абразивной частицы в поверхностный слой; σ_a – нормальное напряжение на пятне контакта.

Процесс внедрения частицы в поверхность начинается после потери несущей способности последней под воздействием абразивной частицы [5]. Для тел с трещинами и трещиноподобными дефектами, которые всегда имеются в материале, предельная несущая способность характеризуется критическим коэффициентом интенсивности напряжений [6]. Исходя из этого, нормальное напряжение на пятне контакта можно принять равным

$$\sigma_a = \frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi h}}, \quad (2)$$

где K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений в материале; h – толщина пластически деформируемого слоя материала.

С учетом формулы (2) уравнение (1) принимает следующий вид:

$$N_a = \frac{2,5\epsilon r^2 K_{IC}}{h^{1/2}} \quad (3)$$

По данным [7] при $\epsilon < 0,02$ происходит упругое деформирование материала, если $0,02 \leq \epsilon \leq 0,5$ – пластическое деформирование, при $\epsilon \geq 0,5$ – микрорезание.

В результате перемещения относительно закрепленной частицы на поверхности материала остается след объемом V_{ca}

$$V_{ca} = \frac{4}{3} h_a^2 \Delta L = \frac{4 h_a^2}{3 r^2} r^2 \Delta L = \frac{4}{3} \epsilon^2 r^2 \Delta L, \quad (4)$$

где ΔL – длина следа.

Разрушение материала наступает после определенного числа циклов нагружения. Поэтому объем разрушенного материала V_{pa} под воздействием единичной абразивной частицы равен [1]

$$V_{pa} = \frac{V_{ca}}{n_p}, \quad (5)$$

где n_p – долговечность материала.

Долговечность материала зависит от вида нарушения фрикционных связей при микрорезании $n_p = 1$, при пластическом деформировании $1 < n_p < \infty$ и при упругом деформировании $n_p < \infty$, но больше долговечности при пластическом деформировании.

Для определения n_p при абразивном изнашивании рекомендуется [7, 8] использовать уравнение Коффина.

$$\Delta \epsilon n_p^k = C, \quad (6)$$

где $\Delta \epsilon$ – текущее значение неупругой деформации; $k = 0,5$ – коэффициент; $C = \delta$ – константа; δ – относительное удлинение при растяжении материала.

После подстановки выражений (4) и (6) в уравнение (5) получаем:

$$V_{pa} = 1,3 \frac{\epsilon^2 r^2 \Delta L \epsilon^2}{\delta^2}, \quad (7)$$

Общая динамическая система. Запишем уравнение динамического равновесия в контакте абразивных частиц с поверхностью

$$\sum_{i=1}^{a_{уд}} N_{ai} = P_{уд} \quad (8)$$

где $a_{уд}$ – удельное число абразивных частиц; $P_{уд}$ – удельная нагрузка

Из выражения (8) с учетом (3) получим

$$a_{уд} = \frac{P_{уд}}{N_a} = 0,4 \frac{P_{уд} h^{1/2}}{\epsilon r^2 K_{IC}} \quad (9)$$

Принимая во внимание (7) и (9), уравнение разрушения объема материала V_p под действием абразивных частиц a на пути трения ΔL можно записать в следующем виде:

$$V_p = a V_{pa} = a_{уд} S V_{pa} = 0,5 \epsilon \frac{P_{уд} \Delta L S \Delta \epsilon^2 h^{1/2}}{K_{IC} \delta^2}, \quad (10)$$

где a – общее число абразивных частиц; S – площадь разрушаемой поверхности.

Просуммировав (10), получим уравнение разрушения объема основного материала V_0 на пути трения L

$$V_0 = \sum_L V_p = b_0 \frac{P_{y\alpha} L S \Delta \varepsilon^2 h^{\frac{1}{2}}}{K_{IC} \delta^2},$$

где $b_0 = 0,5\varepsilon$ – коэффициент.

Тогда интенсивность разрушения основного металла под воздействием абразивных частиц равна

$$I_0 = \frac{V_0}{SL} = b_0 \frac{P_{y\alpha} h^{\frac{1}{2}} \Delta \varepsilon^2}{K_{IC} \delta^2} \quad (11)$$

Рассмотрим модель разрушения загрязнения. Локальная динамическая система. Нормальная нагрузка на абразивную частицу может быть определена по формуле (1). Так как загрязнение относится к хрупким материалам, то под воздействием абразивной частицы оно будет деформироваться упруго и разрушаться хрупко. Поэтому можно принять, что нормальное напряжение на пятне контакта абразивной частицы с загрязнением равно

$$\sigma_{a3} = \sigma_{упр.3} \approx HB_3, \quad (12)$$

где $\sigma_{упр.3}$ – предел упругости загрязнения; HB_3 – твердость загрязнения.

После подстановки выражения (12) в уравнение (1) получаем:

$$N_{a,3} = 2,5\varepsilon r^2 HB_3. \quad (13)$$

При перемещении относительно закрепленной абразивной частицы на поверхности загрязнения остается след, как результат реализации процесса разрушения. Объем следа разрушения загрязнения $V_{раз}$ равен

$$V_{раз} = \frac{4}{3} h_a^2 \Delta L = \frac{4h_a^2}{3r^2} r^2 \Delta L = \frac{4}{3} \varepsilon^2 r^2 \Delta L = 1,3\varepsilon^2 r^2 \Delta L, \quad (14)$$

где ΔL – длина следа.

Общая динамическая система. Уравнение динамического равновесия имеет вид (8). Откуда с учетом (13) можно записать

$$a_{y\alpha} = \frac{P_{y\alpha}}{N_a} = 0,4 \frac{P_{y\alpha}}{\varepsilon r^2 HB_3}. \quad (15)$$

Тогда уравнение разрушения объема загрязнения $V_{p,3}$ под действием абразивных частиц a на пути трения ΔL после подстановки (14) запишется как

$$V_{p,3} = aV_{раз} = a_{y\alpha} S V_{раз} = 0,5\varepsilon \frac{P_{y\alpha} \Delta L S}{HB_3}. \quad (16)$$

Суммируя (16), получим уравнение разрушения объема загрязнения V_3 на пути трения L

$$V_3 = \sum_L V_{p,3} = b_3 \frac{P_{y\alpha} L S}{HB_3}$$

где $b_3 = 0,5\varepsilon$ – коэффициент

Интенсивность разрушения загрязнения под воздействием абразивных частиц равна

$$I_3 = \frac{V_3}{SL} = b_3 \frac{P_{y\alpha}}{HB_3} \quad (17)$$

С учетом выражений (11) и (17) искомая модель абразивной трибоочистки имеет следующий окончательный вид

$$I = I_0 + I_3 = P_{\text{уд}} \left(b_0 \frac{h^{1/2} \Delta \varepsilon^2}{K_{\text{IC}} \delta^2} + b_3 \frac{1}{HB_3} \right). \quad (18)$$

В модели (18) выделим группы факторов, характеризующие:

1) режим нагружения основного металла

$$H_0 = b_0 P_{\text{уд}} \Delta \varepsilon^2; \quad (19)$$

2) режим нагружения загрязнения

$$H_3 = b_3 P_{\text{уд}}; \quad (20)$$

3) свойства основного металла

$$M_0 = \frac{h^{1/2}}{K_{\text{IC}} \delta^2}; \quad (21)$$

4) свойства загрязнения

$$M_3 = \frac{1}{HB_3}.$$

После подстановки (19)–(21) в модель (20) запишем

$$I = H_0 M_0 + H_3 M_3,$$

откуда ясно, что интенсивность абразивной трибоочистки зависит от режима нагружения, механических свойств основного металла и загрязнения. Наибольшее влияние на интенсивность очистки оказывает пластичность и текущее значение неупругой деформации основного металла, так как они входят в модель (18) с показателем степени равным двум, далее по степени влияния следуют коэффициенты, удельная нагрузка, вязкость разрушения, показатель степени которых в модели (18) равен единице. Наименее значимым следует ожидать влияние фактора защиты деформируемого слоя с показателем степени 1/2.

Экспериментальная проверка достоверности модели (18) проводилась путем лабораторных триботехнических испытаний пары трения скольжения «диск-диск» в скрепленном положении на установке [2].

Неподвижный диск изготавливался из стали Ст3, и наплавлялся ленточным релитом плазменным способом посредством установки УД-417. После наплавки на рабочей поверхности формировался макрогетерогенный композит типа «зерна релита-матрица на основе железа», в котором зерна релита имели сферическую форму. Движущиеся диски изготавливались из сталей 10, 20, 45 с последующей термообработкой в следующем режиме: нагрев до 830 °С в течение 1 ч, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. В результате термообработки диски покрывались окалиной, которая удалялась в процессе последующих триботехнических испытаний.

Режим триботехнических испытаний был следующий: прижимающее усилие $F=1200\text{Н}$, скорость относительного перемещения $V=1,31\text{м/с}$, продолжительность испытаний $t=120\text{с}$. Непосредственно через зону трения осуществлялась прокатка воды. Результаты сопоставления экспериментальных данных с расчетными показаны на рис. 3.

Статистическим анализом показано, что изложенная расчетная схема адекватно описывает процесс трибоочистки. При этом с вероятностью не менее 90 % средние из десяти значений экспериментально зарегистрированных интенсивностей трибоочистки группируются вокруг расчетного значения в указанном на рис.3 доверительном интервале. Принимая во внимание статический характер трибоочистки, такие расхождения можно считать приемлемыми.

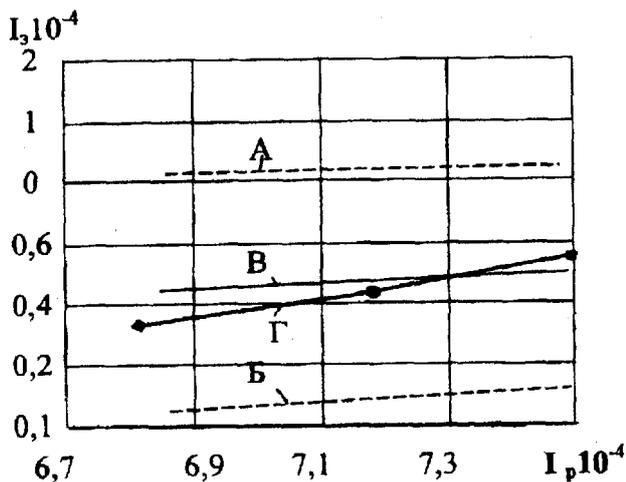


Рис.3 Корреляция расчетных и экспериментальных значений интенсивности абразивной трибоочистки:

A, B – границы доверительного интервала расчетных значений; B – расчетные значения
 Γ – экспериментальные значения;

Δ – сталь 45; o – сталь 20; \square – сталь 10

Таким образом, аналитическая закономерность (18) позволяет эффективно управлять процессом абразивной трибоочистки на практике.

Список литературы

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Дворук В.И. Научные основы повышения абразивной износостойкости деталей машин. – К.: КМУГА, 1997. – 101 с.
3. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1989. – 177 с.
4. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
6. Троценко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при цилиндрическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1987. – 256 с.
7. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 166 с.
8. Погодаев Л.И., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.

Стаття надійшла до редакції 26 листопада 1999 року.