

УДК 620.178.16.004

КИНЕТИКА ВНЕДРЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА В ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ МЕТАЛЛА

Кюрчев С.В., к.т.н.

Юдовинський В.Б., к.т.н.

Журавель Д.П., к.т.н.

Мирненко Ю.П. інженер

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (061) 42-13-54

Ключеві слова – деформация поверхностного слоя, абразивное зерно, перлитная основа чугунов, работа деформации, энергоёмкость поверхностного слоя.

Анотація – робота присвячена визначенню кінетики внедрения абразивного зерна в поверхностный слой металла и её влияние на энергоёмкость поверхностных слоев металла.

Постановка проблеми. Наиболее распространенным видом изнашивания деталей узлов и агрегатов машин является абразивное изнашивание. Для абразивного изнашивания чугунов характерно внедрение абразивного зерна в поверхностные слои металлической основы или в графитные включения. Особенно это явление наблюдается на направляющих металлорежущих станков, на которые интенсивно оседает пыль с большим количеством абразивной составляющей. [1]. Если внедрение абразивного зерна в графитные включения не сказывается на целостности поверхностного слоя металлической основы чугунов, то внедрения или деформация металлической основы чугунов абразивным зерном, под действием внешних сил, является основным фактором разрушения поверхностного слоя.

Аналіз останніх досліджень. Вопросам абразивного изнашивания посвящено много работ [2,3]. Но они, в основном, рассматривают микрорезание абразивным зерном поверхностных слоев металла. Кроме того, абразив, попадая в зону контакта двух поверхностей, не только является микрорезцами, но и прямыми деформаторами поверхностного слоя, что способствует разрушению и дальнейшему ускоренному износу поверхностных слоев чугунов. Однако вопросам кинетики внедрения абразивного зерна в металлическую основу внимание не уделялось.

Формулювання цілей статті. Целью статьи является изучение кинетики внедрения абразивного зерна в поверхностный слой металла.

Основная часть. Воздействие абразивного зерна при абразивном изнашивании на малую площадь поверхности металла вызывает

пластическую деформацию поверхностного слоя в месте контакта абразивного зерна и поверхности. Иначе говоря, приводит к ползучести некоторого объема металла.

Основой механизма ползучести является скольжение определенных атомных плоскостей по определенным направлениям в результате продвижения дислокаций.

При мгновенном действии абразивного зерна на поверхностный слой металла, пластическая деформация сосредотачивается в узких пачках плоскостей скольжения, где величина локального сдвига чрезвычайно велика. Заключенные между этими пачками области, составляющие большую часть объема, остаются недеформированными.

При более длительном воздействии абразивного зерна на поверхностный слой металла – скольжение идет более равномерно, по большему числу близко расположенных атомных плоскостей, причем, относительные перемещения соседних плоскостей невелики – несколько межатомных расстояний.

Полная пластическая деформация выражается следующим уравнением:

$$l = p + l_0 = p + \frac{G}{E} + g(\sigma_{\max}) \quad (1)$$

где l - полная деформация,

p - деформация ползучести,

l_0 - мгновенная деформация:

$\frac{G}{E}$ - обратимая упругая часть мгновенной деформации;

$g(\sigma_{\max})$ - необратимая часть деформации.

Скорость пластической деформации в каждый момент зависит от действующего напряжения σ , температуры T или внешней энергии W и от структурного состояния металла в данный момент.

Итак,
$$\frac{dp}{dt} = v(\sigma, T, q_1, \dots, q_n). \quad (2)$$

Здесь через q_1, \dots, q_n обозначены параметры, характеризующие структурные состояния.

Продифференцируем обе части уравнения (1) по времени. Тогда с учетом уравнения (2), получим

$$\frac{dl}{dt} = v(\sigma, T, q_1, \dots, q_n) + \frac{d\sigma}{E} + \chi_q(\sigma) \frac{d\sigma}{dt} \quad (3)$$

Если процесс деформирования начался в момент $t=0$, а уравнение (3) относится к моменту t , то $\chi = 1$, если $\sigma(t) > \sigma(\tau)$, где $0 \leq \tau \leq t$ и $\chi = 0$, если можно указать такой момент τ , $0 \leq \tau \leq t$ что $\sigma(\tau) > \sigma(t)$.

Согласно гипотезе упрочнение в правой части формулы (2) фигурирует только один структурный параметр, параметр упрочения.

Принимая, что степень упрочения возрастает по мере накопления деформаций ползучести, можно выбрать в качестве параметра упрочения величину накопленной деформации ползучести P .

Таким образом

$$\frac{dp}{dt} = v(\sigma, T, p) \quad (4).$$

Кривые ползучести описываются функцией времени, так что деформация ползучести материала пропорциональна t^m . В соответствии с этим закон упрочения выбирается в виде

$$\frac{dp}{dt} = p^{-\alpha} f(\sigma), \quad \text{где } \alpha = \frac{1-m}{m}, \quad (5)$$

если $\sigma = const$, то из зависимости (5) следует

$$p = [(1 + \alpha)f(\sigma)t]^m$$

Функция $f(\sigma)$ аппроксимируется следующим выражением:

$$f(\sigma) = B \cdot \sigma^n,$$

$$f(\sigma) = k \cdot \exp \frac{\sigma}{A},$$

$$f(\sigma) = 2kSn \frac{\sigma}{A},$$

где B, n, k, A - константы, зависящие от температуры или от приложении внешней энергии.

Величина P , правой части уравнения (4) фигурирующая как параметр упрочения, представляет собой деформацию ползучести, но не полную пластическую деформацию. Мгновенная пластическая деформация величина её не превышает 1-2 %, практически не создает упрочения и не влияет на скорость ползучести.

Величина накопления деформации поверхностного слоя, в результате воздействия абразивного зерна, является функцией многих переменных – приращения напряжения поверхностного слоя G , времени t , скорости нагружения (или скорости деформации) V , силы деформации Q , энергоемкости поверхностного слоя метала \mathcal{E}_M и работы деформации W .

$$\varepsilon = f(\sigma, t, v, Q, W, \mathcal{E}_M). \quad (6)$$

Согласно теории ползучести металлов кривые ползучести или деформация поверхностного слоя описывается степенной функцией времени

$$\varepsilon = B \cdot t^m \quad (7)$$

Но так как величина накопления деформации поверхностного слоя в результате воздействия абразивного зерна зависит от величины силы деформации, то выражение (6) примет вид

$$\varepsilon = f(Q) \cdot B \cdot t^{\frac{m}{f(Q)}} \quad (8)$$

Эта зависимость представлена на рис.1

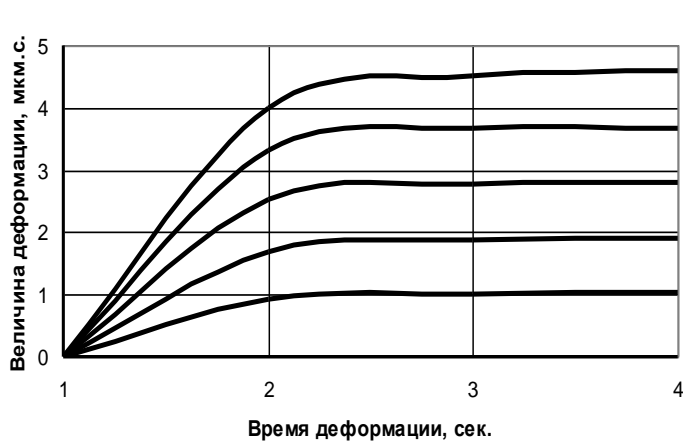


Рис.1. Зависимость величины деформации перлитной основы серых чугунов СЧ 30 в зависимости от времени деформации при различных нагрузках абразивного зерна Q.

Из этих зависимостей видно, что величина деформации растет с увеличением времени деформации, а также прямо пропорционально сказывается и величина силы деформации.

Если привести $f(Q)$ к виду (α) , то выражение (8) примет вид

$$\varepsilon = \alpha \cdot B t^{\frac{m}{\alpha}} \quad (9)$$

где: $\alpha = f(Q)$, при выражении Q в граммах $\alpha = 0,1Q$.

Так для чугунов СЧ30 после износа уравнение (9) имеет вид:

$$\varepsilon_{10} = 0,1 \cdot Q \cdot 0,89 t^{0,05/0,1Q} \quad \text{или} \quad \varepsilon = 0,089 Q t^{0,5/Q}$$

Влияние скорости деформации на величину накопления деформации поверхностного слоя выражается зависимостью:

$$\varepsilon = C \cdot l^{f(v)},$$

где: $f(v)$ показатель натурального логарифма – функция скорости равная

$$f(v) = \beta - v.$$

Увеличения скорости деформации поверхностного слоя уменьшает величину деформации. При больших скоростях деформация не успевает проникнуть (распространяться) на большую глубину.

Так например, при нагрузке Q=10грамм $\beta = -0,15; C = 2,06$ и уравнение (9) примет вид:

$$\varepsilon_{10} = 2,06 \cdot l^{-0,15V},$$

а при нагрузке $Q=15$ грамм $\beta = -0,045; C = 49,5$
уравнение накопления деформации от скорости будет иметь вид:

$$\varepsilon_{15} = 49,5 \cdot l^{-0,045V}$$

Большое влияние на накопление деформации в поверхностном слое металлов оказывает напряжение поверхностного слоя, возникающие в процессе приложения внешних энергий, которые являются неотъемленной частью процесса изнашивания.

Это влияние выражается следующим соотношением (с поправкой на малые напряжения):

$$\varepsilon = A \cdot \sigma^n = f(\sigma). \quad (10)$$

Для чугуна СЧ 30, подвергнувшегося поверхностному износу, влияние приложения напряжения поверхностного слоя на величину деформации, выражается следующей зависимостью:

$$\varepsilon = 0,054 \cdot \sigma^{0,87}$$

В свою очередь, напряжение поверхностного слоя перлитной основы чугунов зависит от величины приложенной внешней энергии. Причем, с увеличением приложенной внешней энергии деформации резко растет приращение напряжения поверхностного слоя, вызванное деформацией.

Эту зависимость можно записать в следующем виде:

$$\sigma = D \cdot W^K, \quad (11)$$

где: K - показатель степени, (для чугуна СЧ 30, после изнашивания, равен $K=0,5$);

W - внешняя энергия деформации;

D - коэффициент, зависящий от материала и вида внешней деформации.

Для чугунов СЧ30, после изнашивания эта зависимость принимает вид

$$\sigma = 0,5 \cdot 10^6 W^{0,5}$$

Одной из основных характеристик поверхностного слоя металла является его энергоемкость \mathcal{E}_M .

Величина накопления деформации поверхностного слоя в зависимости от энергоемкости металла выражается зависимостью

$$\varepsilon = k \cdot \mathcal{E}_M + b \cdot f(Q). \quad (12)$$

Но так как энергоемкость \mathcal{E}_M , в свою очередь зависит от величины внешнего давления, то

$$\varepsilon = f(Q)k\mathcal{E}_M + b \cdot f(Q). \quad (13)$$

С увеличением энергоемкости поверхностного слоя металла величина накопления деформации падает. Увеличение же внешней нагрузки пропорционально увеличивает величину деформации.

Как рассматривалось уже раньше, функцию $f(Q)$ можно представить как:

$$f(Q) = \alpha,$$

тогда уравнение (13) можно записать в виде более простом:

$$\varepsilon = \alpha \cdot k \cdot \mathcal{E}_M + b \cdot \alpha. \quad (14)$$

При выражение Q в граммах, $\alpha=f(Q)=0,1Q$

При нагрузке $Q=10$ грамм на абразивное зерно, которое вдавливаются в изношенную поверхность (перлитную основу чугуна) СЧ 30 величина накопления деформации равна $\varepsilon = -9 \cdot 10^{-6} \cdot \mathcal{E}_M + 2,45$

а при нагрузке $Q=15$ грамм, $\varepsilon = -13,5 \cdot 10^{-6} \cdot \mathcal{E}_M + 2,95$

В свою очередь энергоёмкость \mathcal{E}_M является функцией внешней энергии деформации W , скорости деформации поверхностного слоя V , силы деформации, прикладываемой к абразивному зерну в процессе внедрения в перлитную основу чугунов.

$$\mathcal{E}_M = f(W, V, Q). \quad (15)$$

Математическая зависимость энергоёмкости от скорости деформации выражается уравнением.

$$\mathcal{E}_M = \varphi(Q) \cdot C \cdot V^{\varphi(Q) \cdot \delta}, \quad (16)$$

где: V - скорость деформации поверхностного слоя в мкм/сек.

δ - показатель степени, зависящей от свойства материала и величины внешней нагрузки.

$\varphi(Q)$ - функция силы Q , которую можно выразить через параметры ζ_1 и ζ_2 , изменяющиеся от состояния поверхности.

Для чугуна СЧ 30 после износа - $\xi_1 = 1,15; \xi_2 = 1,22$

Заменив функцию через выражение, уравнение примет вид:

$$\mathcal{E}_M = \frac{Q}{\xi_1} \cdot C \cdot V^{\frac{Q \cdot \delta}{\xi_2}}. \quad (17)$$

Для изношенной поверхности чугуна СЧ 30 при внешней нагрузке на абразивное зерно $Q=10$ грамм эмпирическое уравнение зависимости энергоёмкости металлов от скорости деформации имеет вид :

$$\mathcal{E}_M = 66 \cdot 10^3 \cdot V^{0,18}, \text{кг/мм}^3,$$

а для нагрузки $Q=15$ грамм:

$$\mathcal{E}_M = 54,4 \cdot 10^3 \cdot V^{0,16}, \text{кг/мм}^3.$$

Эти зависимости представлены на Рис.2.

Незначительное увеличение скорости деформации поверхностного слоя абразивным зерном увеличивает энергоёмкость этого слоя металла.

Зависимость энергоёмкости поверхностного слоя металла от внешней энергии деформации выражается уравнением

$$\mathcal{E}_M = N \cdot W^\lambda.$$

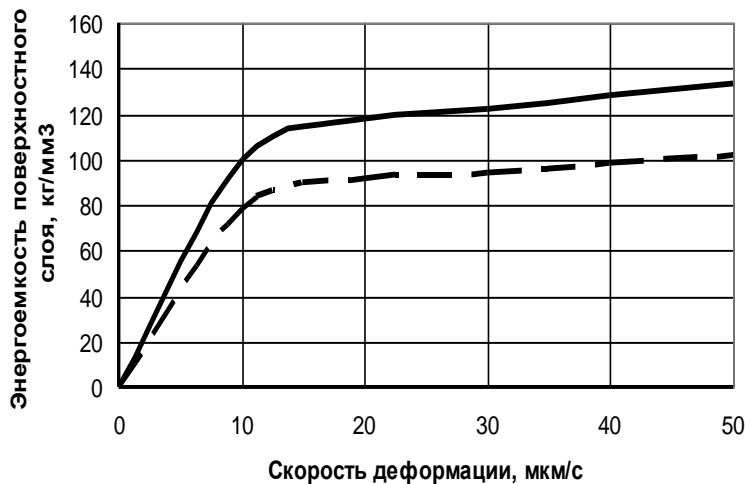


Рис.2. Зависимость энергоемкости поверхностного слоя перлитной основы чугунов \mathcal{E}_M от скорости деформации V при внешней нагрузке на зерно: 1- 10 грамм, 2-15 грамм

Экспериментальная зависимость энергоемкости от величины внешней энергии деформации представляет собой степенную зависимость.

Коэффициент λ для чугуна СЧ 30 равен $\lambda = 0,4$. С увеличением внешней энергии деформации или работы деформации растет и энергоемкость поверхностного слоя металла.

От действия внешней силы деформации за счет вдавления абразивного зерна в перлитную основу чугунов энергоемкости выражается следующей зависимостью:

$$\mathcal{E}_M = k \cdot Q^\gamma. \quad (18)$$

Энергоемкость металлов от силы деформации растет. Но при нагрузке 3-5 грамм наблюдается некоторую стабилизацию величины энергоемкости. Это объясняется переходом при данной нагрузке из упругого в пластическое деформирование.

На основании перечисленных выше зависимостей можно вывести основные зависимости и закономерности поведения поверхностного слоя перлитной основы чугунов, подвергающихся воздействию абразивного зерна под действием внешних сил.

Величину накопления деформации в результате действия абразивного зерна можно представить в виде зависимости (13) с заменой энергоемкости зависимостью (16):

$$\varepsilon = k \cdot f(Q) \cdot C \cdot \varphi(Q) \cdot V^{\varphi(Q)\delta} + b \cdot f(Q), \text{ мкм.} \quad (19)$$

где: k, c, b - коэффициенты, зависящие от материала и параметров нагружения абразивного зерна.

Или можно представить, как функцию внешней силы нагружения

$$\varepsilon = k \cdot f(Q) \cdot k_1 \cdot Q^\gamma + b \cdot f(Q), \text{ мкм.} \quad (20)$$

При определенных режимах выбора параметра нагружения, можно записать

$$f(Q) = \alpha$$

тогда:
$$\varepsilon = \alpha(k \cdot k_1 \cdot Q^\gamma + b). \quad (21)$$

Подставив это значение величины деформации в зависимость (19) получим, что скорость деформации поверхностного слоя перлитной основы чугунов при воздействии абразивного зерна в основном зависит от внешней силы нагружения

$$V = \left(\frac{k_1 \cdot \xi_1 \cdot Q^\gamma}{C \cdot Q} \right)^{\xi_2 / Q \cdot \delta}, \text{ мкм/с} \quad (22)$$

Заменим коэффициенты $k_1; \xi_1; C$ через A , а $\xi_2; \delta$ через B то получим:

$$V = \left(A \frac{Q^\gamma}{Q} \right)^{B/Q}, \text{ мкм/с} \quad (23)$$

Величина износа поверхности зависит от величины накопления деформации на поверхности металла. Таким образом, чтобы знать предрасположение поверхностного слоя металла к износу и возможность его изнашивания, необходимо знать время накопления деформации поверхностного слоя перлитной основы чугунов.

Время накопления деформации поверхностного слоя при воздействии абразивным зерном выражается зависимостью:

$$t = \left(\frac{k \cdot f(Q) \cdot C \cdot \varphi(Q) \cdot V^{\varphi(Q) \cdot \delta}}{B \cdot f(Q)} \right)^{f(Q)/m}, \text{ с} \quad (24)$$

Заменив коэффициент k, c , в общем коэффициентом A_γ , получим выражение времени накопления деформации:

$$t = \left(A_\gamma \cdot Q \cdot V^{B_v \cdot Q} \right)^{\alpha/m}, \text{ с} \quad (25)$$

Таким образом, время накопления деформации зависит от внешней нагрузки и скорости деформирования.

Рассмотрев энергоемкость, как функцию приращения напряжения поверхностного слоя, получаем зависимость

$$\mathcal{E}_M = \frac{f(\sigma) - b \cdot f(Q)}{k \cdot f(Q)}; \text{ кДж/мм}^3 \quad (26)$$

Энергоемкость поверхностного слоя металла находится в степенной зависимости от приращения напряжения поверхностного слоя.

$$\mathcal{E}_M = \frac{A \cdot \sigma^n - b \cdot \alpha}{k \cdot \alpha}; \quad \mathcal{E}_M = f(\sigma) \quad (27)$$

Выводы. 1. Энергоемкость является функцией приращения напряжения поверхностного слоя металла и зависит от времени накопления деформации, которая, в свою очередь, зависит от внешней нагрузки и скорости деформирования.

2. Энергоемкость поверхностных слоев металла является характеристикой, которая позволяет оценивать поверхностные слои по способности накопления деформации при воздействии абразивного зерна, а также оценивает их способность противостоять изнашиванию в процессе абразивного износа.

2. Энергоемкость поверхностных слоев металла, являясь функцией сил деформации, позволяет устанавливать пределы силовых характеристик узлов трения при абразивном изнашивании.

Литература.

1. Юдовинский В.Б., Просвирин В.И., Красавчиков М.В., Масюткин Д.Е. Очистка масел технологического оборудования машиностроения. Труды ТГАТА, выпуск 24, Мелитополь, 2004.- с.56-64.

2. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. – М.; 1960.-351с.

3. Костецкий Б.И. Трение, износ и смазка. М.: Техника,1970,-396с.

КИНЕТИКА ВНЕДРЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА В ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ МЕТАЛЛА.

V.Yudovynsky, S. Kurtchev, D.Zhuravel, Y.Mirnenko,

Summary

Работа посвящена изучению кинетики внедрения абразивного зерна в поверхностный слой металла и её влияние на энергоемкость поверхностных слоев металла.