

УДК 510.67.004.624

DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_255

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

ENERGY CRITERION OF MATERIALS' WEAR RESISTANCE

К.К. СЕЙТКАЗЕНОВА, Д.С. МЫРЗАЛИЕВ, Б.Р. АРАПОВ, Б.Б. ЖУМАЛИЕВ, Е. АКИМ

K.K. SEITKAZENOVA, D.S. MYRZALIEV, B.R. ARAPOV, B.B. ZHUMALIYEV, E. AKIM

(Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова, Республика Казахстан)

(M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)

E-mail: kseitkazi@mail.ru

В статье показана возможность применения структурно-энергетического подхода для моделирования процесса изнашивания материалов, предложен энергетический критерий износостойкости, представляющий собой критическую плотность потока энергии деформации $W_{кр}^$, который зависит от дислокационной структуры, от схемы напряженного состояния изнашиваемых слоев материалов и характеризует их предельные возможности. Показана связь энергетического критерия с параметрами, учитывающими динамический характер внешнего нагружения. Описаны процессы накопления повреждений при внешних воздействиях на поверхность материалов.*

The article shows the possibility of applying the structural-energy approach to modeling the process of materials' wear, an energy criterion of wear resistance is proposed, it is the critical density of the deformation energy W_{cr}^ that depends on the dislocation structure and on the stress state diagram of the materials' wear layers, the criterion characterizes their ultimate possibilities. The relationship between the energy criterion and the parameters that take into account the dynamic nature of external loading is shown. The processes of damage accumulation under external influences on the surface of materials are described.*

Ключевые слова: износ, эрозийная стойкость, плотность, мощность деформации, структура, разрушение.

Keywords: wear, erosion resistance, density, power of deformation, structure, destruction.

Введение

Оборудование любой отрасли, в том числе и текстильной промышленности? работает в сложных условиях эксплуатации при повышенных скоростях и значительных нагрузках динамического и циклического характера. Текстильное оборудование работает в среде текстильной пыли и пуха, которые, обладая сильным абразивным воздействием, проникают в узлы трения, усиливают их износ и резко снижают долговечность деталей и механизмов. При этом рабочие органы текстильных машин и нитоконтактирующие детали непосредственно взаимодействуют с продуктом, обладающим истирающим и абразивным действием. Поэтому основная часть деталей (82 % отказов) выходит из строя вследствие повреждений трущихся поверхностей, обусловленных механическим и эрозионным износом, и только 8...10 % отказов происходит по причине поломок деталей [1], [2].

Связь между внешним воздействием и износом в рассматриваемых конкретных условиях эксплуатации деталей может быть установлена при помощи нового критерия износостойкости материалов, характеризующего критической плотностью потока энергии деформации или критической поверхностной плотностью мощности деформации $W_{кр}$.

Методы исследования

Выделим в изнашиваемом материале некоторый исходный объем $V_{кр}$ и рассмотрим особенности прохождения потока энергии деформации через сечение этого объема $S_{исх}$, показанное на рис.1. Будем полагать, что в накоплении энергии деформации участвует только часть площади $S_{исх}$, а именно некоторая площадь $S_{ак}$, пропорциональная соответствующему элементарному объему $V_{кр}$, в котором в результате прохождения потока энергии деформации аккумулируется потенциальная энергия. Будем считать, что $S_{исх} > S_{ак}$ и что объему предельного насыщения энергией соответствует площадь $S_{кр}$, которая меньше $S_{ак}$ и, наконец, объему, в котором происходит разрушение V_p , пропорционально площадь S_p меньшая, чем площадь $S_{кр}$.

Для того, чтобы в пределах $S_{кр}$ наступило разрушение, на изнашиваемый материал достаточно воздействовать лишь одному внешнему импульсу. Суммарная плотность потока энергии для площади $S_{кр}$ и для соответствующего объема $V_{кр}$, включая и вклад потока энергии от последнего импульса, будет равна при этом критической плотности мощности $W_{кр}$. В момент разрушения часть рассматриваемого на рис.1 (схема распределения энергии пластической деформации в объеме $V_{исх}$ деформируемого (изнашиваемого) металла: $V_{ак}$ – объем пластически деформируемого металла; $V_{кр}$ – объем с предельным насыщением внутренней энергией; V_p – объем, в котором происходит непосредственное разрушение) объема материала, например верхняя, отделенная от нижней части штриховой линией, будет представлять собой продукты износа, которые согласно принятой схеме будут характеризоваться некоторой средней плотностью энергии деформации, реализуемой в конкретных условиях.

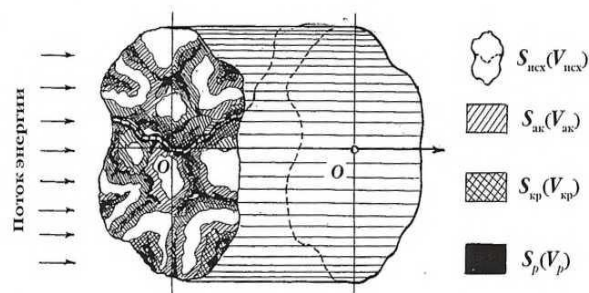


Рис. 1

Обозначим соответствующую объему продуктов износа мнимую плотность мощности деформации через $W_{кр}^*$, а критическую действительную $W_{кр}^{max}$. Ясно, что точность оценки износостойкости материалов с помощью критической плотности мощности деформации будет зависеть от того, как сильно отличается $W_{кр}^*$ от $W_{кр}^{max}$. Для того чтобы располагать достоверными значениями $W_{кр}^{max}$, необходимо знать предельные свойства изнашиваемых материалов. Реализуемая в конкретных условиях изнашивания мнимая критическая плотность мощ-

ности, или реализуемая критическая плотность потока энергии деформации, в уп-

$$W_{кр}^* = \sum_{N=1}^{N_{кр}} W_{акi} = N_{кр} W_{ак}^{cp} = \frac{\xi(N^* \Delta l)_{N=1}^{cp}}{V_{N_{кр}}} N_{ак} = \frac{\xi(Ev)_{N=1}^{cp}}{V_{\vartheta_{кр}}} N_{кр}, \quad (1)$$

где $W_{акi}$ и $W_{ак}^{cp}$ – плотность мощности деформации отдельных ударов и ее среднее значение соответственно при аккумуляции внутренней энергии; N^{cp} – средняя мощность удара; Δl – характерное расстояние, например средний пробег волны пластической деформации; $V_{N_{кр}}$ – деформируемый объем материала, превращающийся в продукты изнашивания после числа ударов $N_{кр}$; E и ϑ – средние значения энергии и скорости удара по изнашиваемой поверхности.

$W_{ак}^{cp}$ связана с w_i^{cp} – усредненной плотностью мощности отдельного удара выражением

$$W_{акi}^{cp} = \xi W_i^{cp} = \frac{\xi N^*}{S_{ак} N_{кр}},$$

где ξ – коэффициент аккумуляции, меньший 1.

Введем обозначение:

$$\chi = \frac{S_{ак}}{(S_{кр} + S_p)}.$$

Из рис. 1 следует, что $\chi \geq 1,0$, так как $S_{ак} > S_{кр} + S_p$. Действительная наибольшая плотность мощности деформации в объемах материала, где происходит предельное насыщение энергией и последующее разрушение, определится с учетом коэффициента χ следующим образом:

$$W_{кр}^{max} = W_p^{cp} \chi = W_i^{cp} [\xi(N_{кр} - 1) + 1]. \quad (2)$$

Подставляя w_i^{cp} из соотношения (2) в исходную формулу (1), получим:

$$W_{кр}^* = \chi W_{кр}^{max} = W_{кр}^{max} \frac{\xi N_{кр}}{\chi[\xi(N_{кр} - 1) + 1]} = \frac{\xi Ev}{V_{N_{кр}}} N_{кр}. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что если коэффициенты $\xi = \chi = 1$, то $W_{кр}^* = W_{кр}^{max}$. В этом случае изнашиваемый материал будет

рощенной записи может быть представлена следующим образом:

обладать наибольшей энергоемкостью. Если $\xi = 0$, то образование продуктов износа будет происходить в результате хрупкого разрушения. Это может иметь место в случае предварительного предельного искажения кристаллической решетки для металлов, когда плотность дислокаций равна критической, а также при упругом деформировании идеального кристалла, у которого плотность дислокаций равна нулю.

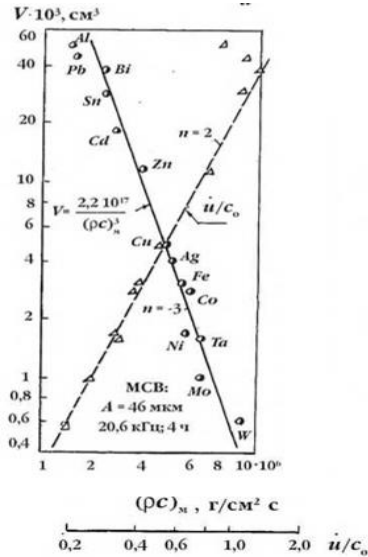
Обсуждение

Проведенный анализ показывает, что величина $S_{ак}(V_{ак})$ является функцией распределения дислокаций. Равномерному распределению дислокаций соответствуют меньшая плотность мощности деформации, вводимая в материал, и более однородное насыщение энергией деформируемых объемов. Значение коэффициента ξ зависит от плотности распределения дислокаций в этих объемах.

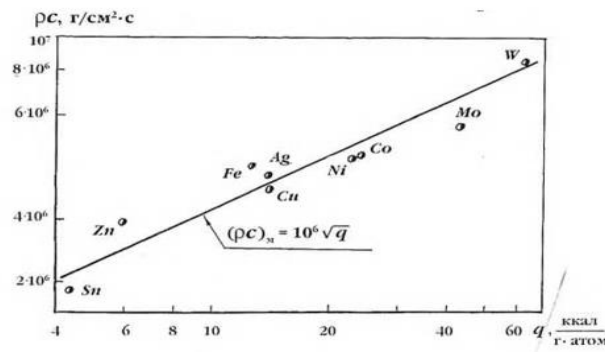
Точное аналитическое определение коэффициентов ξ и χ , а следовательно, и коэффициента χ , в настоящее время достаточно сложно. Поэтому расчетную износостойкость материалов целесообразно определять по соответствующим уравнениям, включающим не $W_{кр}^{max}$ и χ , а осредненный критерий износостойкости $W_{кр}^*$, который зависит от условий нагружения и схемы напряженного состояния тонких изнашиваемых слоев материалов (* – знак осреднения внутренней энергии в изнашиваемом объеме).

В общем случае энергетический критерий $W_{кр}^*$ характеризует предельные возможности материалов как проводников внешней энергии, подводимой к их поверхности посредством разнообразных носителей. Под носителями здесь подразумеваются волновые потоки механической (акустической), тепловой (световой), электромагнитной, электрической и другой энергии различной плотности.

Фронт волны энергии любого происхождения, распространяющийся в рассматриваемой среде с некоторой переносной скоростью, создает поток энергии определенной плотности. Если при этом плотность потока внешней энергии $w_{вн}$ окажется равной критической $W_{кр}^*$, то



а)



б)

Рис. 2

Для подтверждения целесообразности структурно-энергетического подхода при оценке износостойкости материалов и возможности ее представления в связи с различными энергетическими параметрами (критериями) на рис. 2 (влияние акустического сопротивления $(\rho c)_m$ на износ чистых металлов при микроударном нагружении (а) [3]; взаимосвязь $(\rho c)_m$ с абсолютным значением термодинамического потенциала q при нагреве чистых металлов от ОК до температуры плавления (б) [4], [5]) показана зависимость кавитационно-эрозионного износа чистых металлов от их акустического сопротивления ρc (ρ – плотность материала; c – скорость распространения звука в материале).

Опытные точки на рис.2-а можно аппроксимировать степенной зависимостью

$$V = \text{const}_{22} / (\rho c)_m^3, \quad (4)$$

которая, видимо, является одной из фундаментальных закономерностей разрушения

сплошных сред под воздействием ультразвука.

Результат (4) согласуется со структурно-энергетической моделью изнашивания материалов, представленной соотношениями (1). На основании (1), а также известной формулы для определения динамического давления $p = \rho c \dot{u}$ (\dot{u} – массовая скорость перемещения среды под воздействием волны возмущения), можно записать для относительного износа:

$$V_{\text{отн}} = \frac{(E\dot{u})_i}{W_{кр}^*} \sim \left(\frac{p_i}{p_{кр}}\right)^3 \sim \left(\frac{\dot{u}}{v_{кр}}\right)^3 \sim (\rho c)_m^{-3}, \quad (5)$$

где p_i и $p_{кр}$ – текущее и критическое (разрушающее материал) давление; $v_{кр}$ – критическая скорость удара, вызывающая разрушение материала при однократном внешнем воздействии на определенном уровне нагружения.

Из соотношений (5) вытекает пропорциональность между критерием $W_{кр}^*$ и кубом акустического сопротивления материала

(ρc)³. Если в соответствии с рис. 2-б акустическое сопротивление в (4) заменить на значение термодинамического потенциала в степени 1/2, т.е. на $(q)^{1/2}$, то получим зависимость относительного износа от $q^{3/2}$.

В результате выполненных сопоставлений можно отметить, что между механическими, акустическими и термодинамическими (тепловыми) критериями существует взаимосвязь, имеющая четкую физическую интерпретацию с позиций структурно-энергетической теории изнашивания, позволяющая в корректных условиях внешнего воздействия на материалы прогнозировать их поведение и принимать решения о целесообразности их практического использования:

$$W_{кр}^* \sim (\rho c)_m^3 \sim q^{3/2}. \quad (6)$$

Повреждения среды могут накапливаться не только на поверхности, но и в глубине материала. Так, например, при воздействии на твердые материалы ультразвуковых волн, очаги пластической деформации с определенной периодичностью могут возникать по всему объему образца. Показательным является также установленный факт структурных изменений изолированных мезоскопических субстанций при деформировании металлических материалов на макромасштабном уровне [6]. Такую структуру проще представить как двухфазную, состоящую из недеформированной основы и второй фазы в виде пластически деформированных мезообъемов материала.

Процессы накопления (суммирования) повреждений при многократных внешних воздействиях на поверхность материалов формально позволяют рассматривать процессы изнашивания с позиций усталости. При этом, пожалуй, единственное, что объединяет поверхностную усталость, а точнее квазиусталость, с объемной усталостью более крупных деталей – это наличие аккумуляционного периода накопления повреждений до возникновения трещины. Закономерности дальнейшего роста трещин при изнашивании и при объемной усталости различны, т.к. протекают на разных масштабных уровнях и приводят к различным

последствиям: при изнашивании происходит слияние микротрещин и послойное образование продуктов изнашивания определенной крупности; при объемной макроусталости происходит разрушение детали.

ВЫВОДЫ

1. Процессы изнашивания материалов можно проанализировать на основе структурно-энергетического подхода.

2. Критерий $W_{кр}^*$ – потоковая характеристика, учитывающая структурные изменения в материалах при трансляции подведенной энергии в них волнами упругопластических деформаций.

3. Износостойкость любых материалов можно представить в связи с энергетическими уровнями механизмов, которые оказывают наибольшее влияние на структурные изменения в условиях внешнего воздействия.

4. Представленные критерии позволяют прогнозировать поведение материалов в конкретных условиях внешнего нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мнацаканян В.У. Конструкторско-технологические решения проблемы повышения работоспособности подшипниковых опор ткацких машин // Автоматизация и современные технологии. – 2006, №2. С. 3...5.
2. Лебедев Л.В., Мнацаканян В.У., Погонин А.А., и др. Технология машиностроения. – М., 2008.
3. Богачев И.Н., Вайнштейн А.А., Волков С.Д. Введение в статическое материаловедение. – М.: Металлургия, 1972.
4. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972.
5. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984.
6. Погодаев Л.И., Сейтказенова К.К. Моделирование эрозии и долговечности гетерогенных материалов методами механики деформируемых сред. – С-Пб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2003.

REFERENCES

1. Mnatsakanyan V.U. Design and technological solutions to the problem of improving the performance of bearing supports of weaving machines // Automation and modern technologies. - 2006, No. 2. S. 3...5.

2. Lebedev L.V., Mnatsakanyan V.U., Pogonin A.A., et al. Engineering technology. - M., 2008.
3. Bogachev I.N., Vainshtein A.A., Volkov S.D. Introduction to static materials science. – M.: Metallurgy, 1972.
4. Bogachev I.N. Cavitation destruction and cavitation-resistant alloys. – M.: Metallurgy, 1972.
5. Bolotin V.V. Forecasting the resource of machines and structures. - M.: Mashinostroenie, 1984.

6. Pogodaev L.I., Seitkazenova K.K. Modeling of erosion and durability of heterogeneous materials by methods of mechanics of deformable media. - St. Petersburg: Academy of Transport of the Russian Federation, 2003.

Рекомендована кафедрой механики и машиностроения. Поступила 25.05.22.
