

Шевеля В.В., *****Трытек А.**** Жешувский технический университет,
г. Жешув, Польша,** Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина**РЕОЛОГИЯ ВЯЗКОУПРУГОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА**

Для большинства материалов, применяемых в узлах трения, характерна временная зависимость действующих напряжений от деформации. Такая связь, называемая неупругостью или вязкоупругостью, при динамическом (циклическом) нагружении вызывает диссипацию подводимой механической энергии. Реология, как теория вязкоупругости, является аналитической основой описания явлений, связанных с диссипацией механической энергии (внутреннее трение, релаксация напряжений, микроползучесть и т.п.). И хотя реологические модели, описывая неупругие явления, не касаются их физической природы, формализация трибологических проблем в терминах реологии является продуктивной и не теряет своей актуальности [1, 2].

Износостойкий материал должен обладать способностью сглаживать (релаксировать) опасные пики напряжений за счет диссипации механической энергии с переводом ее в теплоту на микро- и субмикроровнях [3]. Неупругие явления при трении, обуславливающие диссипацию, имеют два различных масштаба проявления. С одной стороны, неупругость проявляется при адгезионно-сдвиговом взаимодействии микроучастков фактического контакта (поверхностная диссипация), а с другой стороны, неупругие явления сопутствуют импульсной циклической деформации областей, прилегающих к участкам фактического контакта (объемная диссипация). В обоих случаях диссипативные процессы сопровождаются накоплением скрытой энергии наклепа (изменением внутренней энергии трибосистемы), а большая часть подводимой энергии рассеивается в форме теплоты по механизмам внутреннего трения (ВТ) [3, 4].

Следовательно, в соответствии с упомянутыми выше масштабами проявления следует различать два вида внутреннего трения как фактора диссипации и тепловыделения при контактном взаимодействии. Первый вид внутреннего трения вызывает механические потери при непрерывном образовании и разрушении адгезионных связей, сопровождающихся относительными микросдвигами приповерхностных слоев из-за наличия градиента скорости смещения. Такое внутреннее трение, обусловленное контактно-динамической вязкостью и имеющее адгезионно-сдвиговую природу, можно назвать контактным внутренним трением (КВТ). Этот вид механических потерь является основным источником теплоты, выделяющейся при трении и определяющей температурный режим работы фрикционного контакта.

Другой вид внутреннего трения обусловлен несовершенной упругостью областей, вовлекаемых в динамическое передеформирование при распространении циклических волн деформации, генерируемых дискретным контактом. Отставание деформации от напряжения приводит к тому, что значительная часть подводимой при трении энергии необратимо рассеивается в виде теплоты, вызывая механическую релаксацию, которая является термодинамически обусловленным кинетическим процессом. Этот вид внутреннего трения может быть назван объемным внутренним трением (ОВТ), т. к. механические потери вызываются циклическим передеформированием объемов, составляющих зоны влияния фрикционных связей. Объемное внутреннее трение обеспечивает диссипацию механической энергии по дислокационно-диффузионным механизмам, которые одновременно являются механизмами релаксации динамических напряжений [5, 6].

Адгезионная и деформационная составляющие внешнего трения тесно связаны с контактным и объемным внутренним трением. Очевидно, что реология динамических процессов в рассматриваемых двух областях существенно различается. Соответственно отличаются и механизмы контактной и объемной диссипации энергии. Контактное внутреннее трение главным образом участвует в формировании силы внешнего трения, а объемное внутреннее трение, также влияя на силу трения, преимущественно определяет износостойкость сопряжения.

Таким образом, процесс внешнего трения необходимо рассматривать в терминах двух видов внутреннего трения (КВТ и ОВТ), определяющих динамическую напряженность поверхности и подповерхностных слоев, участвующих в контактном взаимодействии. Для эффективного управления процессами внешнего трения и изнашивания необходима конкретизация механизмов диссипации энергии на основе реологического подхода с учетом процессов динамической микроструктурной перестройки. Проанализируем влияние КВТ и ОВТ на напряженное состояние фрикционного контакта, что необходимо учитывать при разработке принципов управления износостойкостью трибосистем.

Поверхностные адгезионно-сдвиговые механические потери

Рассмотрим случай трения скольжения гладких поверхностей без смазки, когда сила трения преимущественно формируется адгезионно-сдвиговой составляющей, формирующей контактное внутреннее

трение. Известно, что с ростом температуры адгезионная составляющая силы трения уменьшается вследствие снижения тангенциальной прочности адгезионных связей и падения динамической вязкости фрикционного контакта. Вязкоупругий механизм таких изменений можно смоделировать поведением под нагрузкой реологического тела Фойгта (рис. 1, А), в котором полное напряжение сдвига, распределяемое между упругим и вязким элементами, равно [2, 5]:

$$s = G \gamma + \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига;

γ – относительная деформация сдвига;

η – динамическая вязкость.

Если сопряжение подвергается действию периодической сдвигающей силы с частотой ω (например, при фреттинге), тангенциальное локальное смещение по глубине h и соответствующая скорость сдвига описываются следующими выражениями:

$$x(h) = x_{oi} \sin \omega t; \quad v_x = \dot{x} = \omega x_{oi} \cos \omega t, \quad (2)$$

где x_{oi} – амплитуда смещения i -ого слоя.

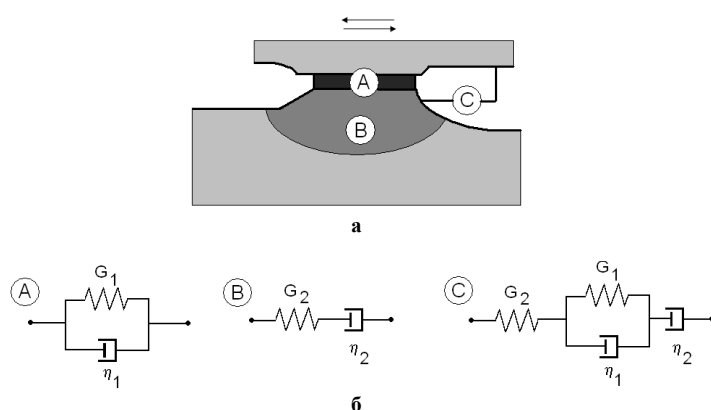


Рис. 1 – Схема локального контактного взаимодействия (а) и реологические тела (б), модулирующие поверхностные (А), объемные (В) и смешанные поверхностно-объемные (С) вязкоупругие свойства зон единичного фрикционного контакта:
А – модель Фойгта; В – модель Максвелла; С – модуль Алфрея-Кобеко

Соответственно относительная деформация сдвига поверхностного слоя и ее скорость изменяются также по гармоническому закону

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t; \quad \dot{\gamma} = \omega \gamma_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

где $\gamma_0 = x_0 / h$ – амплитуда относительной деформации (градиент деформации).

Подставляя (3) в дифференциальное уравнение (1), находим закон изменения сдвигового напряжения

$$s = G \gamma_0 \sin \omega t + \eta \omega \gamma_0 \cos \omega t. \quad (4)$$

Отсюда следует, что по гармоническому закону изменяется и напряжение, амплитуда которого равна

$$s_0 = \sqrt{(G\gamma_0)^2 + (\eta \omega \gamma_0)^2} = \gamma_0 \sqrt{G^2 + (\eta \omega)^2}. \quad (5)$$

Выражение $|G^*| = \sqrt{G^2 + (\omega \eta)^2}$ является абсолютной величиной комплексного модуля сдвига, который может быть записан в следующем виде [5]:

$$G^* = G' + i G'' = G' + i \omega \eta, \quad (6)$$

где $G' = G$ – действительная часть модуля, совпадающая по фазе с деформацией;

G'' – мнимая часть модуля, которая сдвинута по фазе на 90° (модуль потерь).

Рассеяние энергии колебаний характеризуется тангенсом угла контактных потерь (контактное внутреннее трение):

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{G''}{G'} = \frac{\omega \eta}{G}. \quad (7)$$

С учетом (7) формулу (5) можно переписать в следующем виде:

$$s_0 = \gamma_0 |G^*| = \gamma_0 \sqrt{G^2 + (G \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\kappa})^2} = \gamma_0 G \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\kappa}}. \quad (8)$$

Таким образом, амплитуда сдвигового напряжения при формировании фрикционной связи увеличивается с ростом контактного (сдвигового) внутреннего трения.

При фактической площади контакта A_{ϕ} вязкая компонента адгезионно-сдвиговой составляющей силы трения, ответственная за рассеяние энергии, с учетом (1), (3) и (7) равна

$$F_A = A_{\phi} \eta \dot{\gamma} = A_{\phi} \operatorname{tg} \varphi_{\kappa} \cdot G \cdot \gamma_0 \cdot \cos \omega t. \quad (9)$$

Мощность вязкого трения, с учетом (2), равна

$$P = F_A \cdot v_{\kappa} = A_{\phi} \operatorname{tg} \varphi_{\kappa} \cdot G \frac{x_0^2}{h} \omega \cdot \cos^2 \omega t. \quad (10)$$

Умножив и разделив (10) на глубину деформированного слоя h , получим энергию, рассеиваемую в единицу времени в объеме $V = A_{\phi} \cdot h$:

$$P = G \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\kappa} \cdot \gamma_0^2 \cdot \omega \cdot \cos^2 \omega t \cdot V. \quad (11)$$

Средняя величина механической энергии, рассеиваемой за период в единице объема (средний $\cos^2 \omega t = 1/2$):

$$\bar{P}_v = \frac{1}{2} G \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\kappa} \cdot \gamma_0^2 \cdot \omega = \pi \cdot G \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\kappa} \cdot \gamma_0^2 \cdot f, \quad (12)$$

где $f = \omega / (2\pi)$ – линейная частота колебаний.

Следовательно, с увеличением контактного внутреннего трения в приповерхностных слоях одновременно повышаются и напряжения сдвига, и мощность диссипации энергии, что вызывает интенсификацию износа. С повышением температуры в зоне трения динамическая вязкость контакта уменьшается, что, в соответствии с (7), влечет снижение контактного внутреннего трения и соответствующих механических потерь. Эти выводы качественно применимы и для однонаправленного трения, для которого характерен лишь более сложный спектр колебаний.

Объемно-деформационные механические потери

Рассмотрим условия, при которых адгезионно-сдвиговая составляющая контактного взаимодействия сводится к минимуму (повышенная температура, наличие смазки, высокая шероховатость). В этом случае доминируют механические потери в подповерхностных объемах, и они связаны с проявлением несовершенной упругости, которая, как правило, имеет общую тенденцию к росту при повышении температуры. Для моделирования таких процессов в зоне влияния фрикционного контакта (ЗВФК) применима реологическая модель Максвелла (рис. 1, В), согласно которой (в отличие от модели Фойгта) внутреннее трение с увеличением температуры повышается [5]. Модель Максвелла связывает скорость деформации с напряжением и со скоростью изменения напряжения следующим дифференциальным уравнением:

$$\dot{s} + \frac{G}{\eta} s = G \cdot \dot{\gamma}, \quad (13)$$

где S – напряжение сдвига;

G – модуль сдвига;

η – динамическая вязкость.

При действии периодической сдвигающей силы с частотой ω деформация тела Максвелла описывается периодической функцией

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin \omega t, \quad (14)$$

уравнение (13) приобретает следующий вид:

$$\frac{ds}{dt} + \frac{G}{\eta} s = G \omega \gamma_0 \cdot \cos \omega t. \quad (15)$$

Искомое сдвигающее напряжение, как периодическую функцию времени, представим в виде:

$$s(t) = A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t. \quad (16)$$

Соответственно перепишем уравнение (15) в следующем виде

$$A \cdot \omega \cdot \cos \omega t - B \cdot \omega \cdot \sin \omega t + \frac{G}{\eta} A \sin \omega t + \frac{G}{\eta} B \cdot \cos \omega t = G \omega \gamma_0 \cos \omega t. \quad (17)$$

После преобразования получим

$$(A\omega + \frac{G}{\eta}B)\cos\omega t + \left(\frac{G}{\eta}A - B\omega\right)\sin\omega t = G\omega\gamma_0\cos\omega t. \quad (18)$$

Из условия $\frac{G}{\eta}A - B\omega = 0$ следует, что $A \cdot \omega + \frac{G}{\eta}B = G\omega\gamma_0$, что позволяет определить величины B и A :

$$B = \frac{G^2\omega\eta}{\omega^2\eta^2 + G^2}\gamma_0, \quad (19)$$

$$A = \frac{B\omega\eta}{G}\gamma_0 = \frac{G(\omega \cdot \eta)^2}{\omega^2\eta^2 + G^2}\gamma_0. \quad (20)$$

На основании (16), (19) и (20) можно определить амплитуду напряжения:

$$s_0 = \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{G\omega\eta}{\sqrt{G^2 + (\omega\eta)^2}}\gamma_0. \quad (21)$$

Уравнение (21) можно переписать в виде:

$$s_0 = |G^*|\gamma_0, \quad (22)$$

где $|G^*|$ - является абсолютной величиной комплексного модуля сдвига, который, согласно [5], равен:

$$G^* = \frac{iG\omega\eta}{G + i\omega\eta} = \frac{G(\omega\eta)^2}{G^2 + (\omega\eta)^2} + i\frac{G^2\omega\eta}{G^2 + (\omega\eta)^2} = A + iB, \quad (23)$$

где $A = G'$ - динамический модуль сдвига, совпадающий по фазе с деформацией;

$B = G''$ - модуль потерь, который сдвинут по фазе на 90° .

Рассеяние энергии механических колебаний подповерхностных объемов характеризуется тангенсом угла потерь, который является показателем объемного внутреннего трения (ОВТ):

$$\operatorname{tg}\varphi_v = \frac{G''}{G'} = \frac{G}{\omega\eta}. \quad (24)$$

Из (21) с учетом (24) вытекает связь между амплитудой напряжений, действующих в подповерхностных объемах, и уровнем объемного внутреннего трения $\operatorname{tg}\varphi_v$:

$$s_0 = \frac{G\gamma_0}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_v}}. \quad (25)$$

Следовательно, чем больше объемное внутреннее трение (объемная диссипация), обусловленное релаксационными процессами, тем меньше амплитуда динамических напряжений, возникающих в подповерхностных слоях фрикционного контакта. Величина $\operatorname{tg}\varphi_v$, как и логарифмический декремент колебаний $\delta = \pi \cdot \operatorname{tg}\varphi_v$, характеризует релаксационную способность материала при динамическом нагружении.

Смешанные адгезионно-сдвиговые и деформационные потери

Диссипативные свойства трибосистемы при одновременном формировании адгезионно-сдвиговой и объемно-деформационной составляющих силы трения можно смоделировать с помощью четырехэлементного реологического тела Алфрея-Кобеко, представляющего собой последовательную комбинацию тел Фойгта и Максвелла (рис. 1, С). В этом случае скорость общей деформации равна сумме скоростей деформации указанных тел:

$$\dot{\gamma}_0 = \dot{\gamma}_\phi + \dot{\gamma}_m = \frac{\dot{s}}{G_2} + \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2}\right)s - \frac{G_1}{\eta_1}\gamma_\phi. \quad (26)$$

При действии периодической тангенциальной силы $F = F_0 \sin\omega t$ величина внутреннего трения определяется выражением [5]:

$$\operatorname{tg}\varphi_{\Sigma} = \frac{1 + \omega^2 \tau_1^2 + \frac{G_2}{G_1} \omega^2 \tau_1 \tau_2}{\omega \tau_2 \left(\frac{G_1 + G_2}{G_1} + \omega^2 \tau_1^2 \right)}, \quad (27)$$

$$\tau_1 = \frac{\eta_1}{G_1} \text{ и } \tau_2 = \frac{\eta_2}{G_2} \text{ – время релаксации для рассматриваемых тел.}$$

Для гладких поверхностей при $G_2 \gg G_1$ и $\eta_2 \gg \eta_1$ деформация тела Алфрея-Кобеко будет определяться в основном деформацией элемента Фойгта, характеризующего адгезионно-сдвиговые связи. Если, наоборот, поверхности трения имеют большую шероховатость, при $G_2 \ll G_1$, будет доминировать деформация элемента Максвелла, моделирующего потери, связанные с деформационной составляющей силы трения.

Одним из ведущих факторов, влияющих на реологию фрикционного контакта, является температура. В общем случае при произвольных соотношениях между G_1 и G_2 , η_1 и η_2 с ростом контактной температуры (например, при увеличении скорости скольжения), с учетом температурных зависимостей времен релаксации τ_1 и τ_2 на кривой $\operatorname{tg}\varphi(T)$ в соответствии с формулой (27) может сформироваться максимум внутреннего трения (рис. 2). Если его появление связано преимущественно с объемной компонентой потерь $\operatorname{tg}\varphi_v$, будет расти деформационная составляющая силы внешнего трения. Если в формировании упомянутого максимума будет доминировать компонента $\operatorname{tg}\varphi_k$, связанная с адгезионно-сдвиговыми явлениями, повысится адгезионная составляющая силы трения.

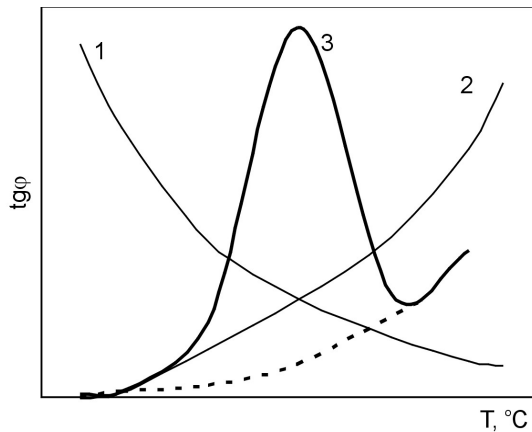


Рис. 2 – Характер температурных зависимостей внутреннего трения, моделируемых реологическими телами Фойгта (1), Максвелла (2) и Алфрея-Кобеко (3)

На рис. 3 показано влияние геометрии контакта на температурные зависимости декремента колебаний, которые изучались на триборелаксаторе, реализующем принцип крутильного маятника [4]. В первом случае осуществлялся контакт без смазки по схеме плоскость – торец полого цилиндра, а во втором – плоскость приводилась в контакт с тремя стальными шариками (ШХ15), покрытыми нитридом титана и закрепленными в торце цилиндра. Крутильные колебания осуществлялись с амплитудой деформации в контакте, не превышающей предварительное смещение. При плоском кольцевом контакте, когда фрикционное взаимодействие локализовано преимущественно в приповерхностном слое, декремент колебаний с повышением температуры монотонно уменьшался, что является характерным для контактного внутреннего трения. Падение механических потерь обусловлено снижением динамической вязкости фрикционного контакта вследствие уменьшения тангенциальной прочности адгезионных связей. При трехточечном контакте в деформацию вовлекаются более глубокие объемы материала, в которых проявляется неупругость, вызывающая диссипацию механической энергии в виде релаксационного пика внутреннего трения в районе 70-80 °С (релаксация Сноэка). Кривая 1 отвечает модели Фойгта, а кривая 2 – модели Алфрея-Кобеко, описывающей смешанное сдвигово-объемное внутреннее трение в зонах фрикционного контакта (рис. 2).

Учитывая, что внутренне трение, реализующее механизмы релаксации напряжений, резко снижает напряжения от импульсов или ударов, сопровождающих внешнее трение, сглаживает динамические

напряжения в местах их концентрации, проблема минимизации износа должна быть увязана с обеспечением высокого объемного внутреннего трения при заданных нагрузочно-скоростных и температурных параметрах контактного взаимодействия [3]. В зависимости от условий внешнего трения и зоны локализации реализуются разнообразные процессы диссипации механической энергии, развивающиеся по механизмам релаксационного, гистерезисного и микропластического внутреннего трения [5, 6].

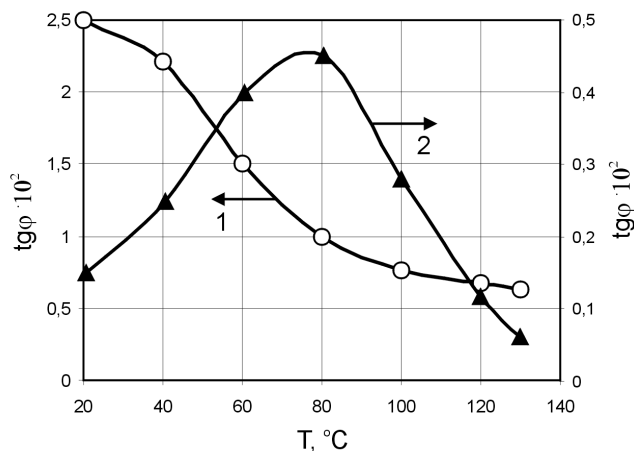


Рис. 3 – Температурные зависимости контактного и контактно-объемного внутреннего трения стали 45, реализованные в плоском кольцевом контакте (1) и трехточечном контакте (2):
 $A = 0,3$ мкм, $f \approx 100$ Гц, $P = 10$ Н

На рис. 4 приведена схема изменения механизмов внутреннего трения с увеличением расстояния h от пятна контакта. Реологические свойства зоны 1 определяются контактным внутренним трением. Зона микропластического внутреннего трения 2 является переходной к областям гистерезисного и релаксационного внутреннего трения, наиболее ответственным за разгрузочно-упрочняющие диссипативные процессы (зоны 3, 4).

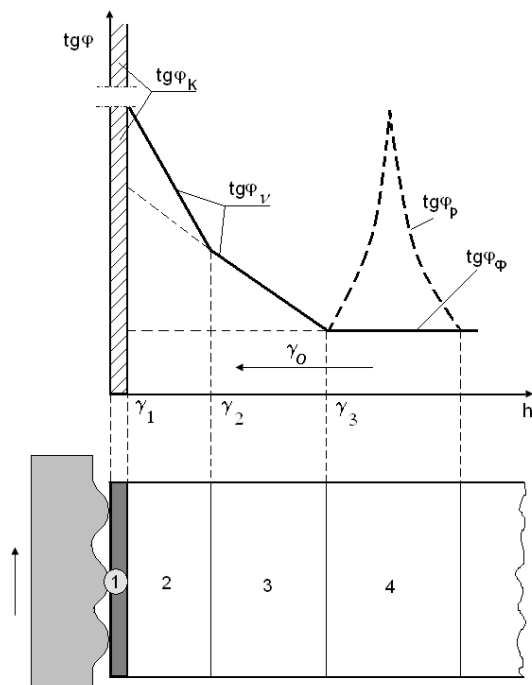


Рис. 4 – Схема амплитудной зависимости внутреннего трения при удалении от пятна фактического контакта:
 1 – зона адгезионно-сдвигового (макроскопического внутреннего трения);
 2 – зона микропластического ВТ;
 3 – зона гистерезисного ВТ;
 4 – зона фона и релаксационных пиков ВТ
 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – критические амплитуды деформации)

К механизмам релаксационного внутреннего трения относятся термоупругая, магнитоупругая и дислокационная релаксации. Эти виды релаксации обусловлены тепловой, магнитной и атомной перестройкой при действии относительно небольших амплитуд деформации, формируя так называемый фон внутреннего трения. На фон внутреннего трения при определенных температурно-частотных параметрах механических колебаний накладываются релаксационные максимумы внутреннего трения: пик Сноэка (диффузия атомов внедрения в поле действующих напряжений в металлах с ОЦК решеткой), пик Финкельштейна-Розина (диффузия атомов внедрения в ГЦК и ГПУ металлах), пик Зинера (диффузия в твердых растворах замещения), деформационный пик Кестера (взаимодействие дислокаций с атомами примесей), зернограничный пик. В температурных диапазонах фазовых переходов возникают максимумы структурной релаксации.

С увеличением амплитуды деформации реализуется гистерезисное внутреннее трение при циклическом движении линейных и поверхностных дефектов структуры (например, дислокационный гистерезис) и при движении границ магнитных доменов (магнитомеханический гистерезис в ферромагнетиках). При значительных амплитудах деформации возникает микропластическое внутреннее трение (размножение и необратимое перемещение дислокаций).

Механизмы и уровень внутреннего трения зависят, с одной стороны, от природы и микроструктуры материалов, а с другой – от нагрузочно-скоростного и температурного режима контактного взаимодействия. Высокое сопротивление износу обеспечивается тогда, когда активизация релаксационных процессов сопровождается динамическим упрочнением вследствие субструктурной перестройки. Совокупность таких явлений можно трактовать как процесс самоорганизации. Обычно самоорганизация при трении (структурная приспособляемость) рассматривается в контексте образования защитно-диссипативных вторичных структур, имеющих трибохимическую природу и сохраняющих устойчивость в определенных нагрузочно-скоростных диапазонах контактного взаимодействия. При этом часто полностью игнорируется роль металлической подложки, реологические свойства которой в первую очередь определяют стабильность и эффективность защитного действия упомянутых вторичных структур. В то же время динамические процессы «структурной самоорганизации» в металлической подложке могут сопровождаться как ростом, так и снижением сопротивления износу. Иллюстрацией этого, например, служит наблюдающееся различие в трибологическом поведении нормализованных и закаленных углеродистых сталей при изменении температурно-скоростного режима трения (рис. 5). При повышении скорости скольжения до 1,5 - 2 м/с в случае нормализованной стали изнашиваемость и коэффициент трения синхронно снижаются (рис. 5, а), а для стали закаленной, наоборот, снижение коэффициента трения сопровождается ростом интенсивности изнашивания (рис. 5, б).

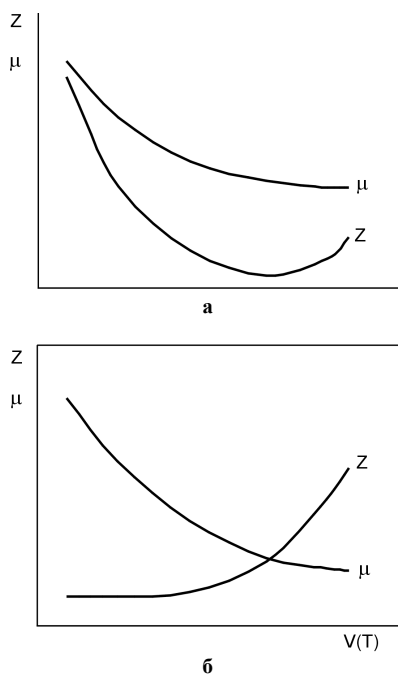


Рис. 5 – Характер влияния скорости трения и контактной температуры на износ (z) и коэффициент трения (μ) нормализованной (а) и закаленной (б) углеродистой стали

В обоих случаях механо-термическая активация поверхностей трения при увеличении скорости скольжения способствует их окислению со снижением адгезионной составляющей силы трения. При

этом в нормализованной стали инициируются объемные релаксационно-упрочняющие процессы, способствующие многократному росту износостойкости стали. В то же время минимизация адгезионно-сдвиговых поверхностных процессов из-за образования экранирующих вторичных структур не обеспечивает эффективного снижения износа закаленной стали при повышенных скоростях трения. Это свидетельствует о различии процессов, формирующих силу трения, и механизмов, ответственных за сопротивление износу.

Таким образом, при трении металлов могут развиваться релаксационно-упрочняющие и релаксационно-разупрочняющие процессы «структурной самоорганизации». К релаксационно-упрочняющим трибологическим процессам относятся: релаксационное и гистерезисное ВТ, динамическое деформационное старение, отпуск под напряжением (закаленная сталь), трибохимические реакции (ОВТ первого рода). К релаксационно-разупрочняющим трибообразованиям относятся образование и разрушение узлов схватывания, а также хрупкое растрескивание (ОВТ второго рода).

Упомянутое выше известное явление резкого роста износостойкости (рис. 5, а) при определенных режимах трения нормализованной стали (эффект Келя-Зибеля) обусловлено термомеханической активацией направленного диффузионного перераспределения примесных атомов (С+N) в неоднородном поле действующих напряжений в диапазоне контактных температур 200...300 °С (релаксация Кестера). Такая диффузионная релаксация сопровождается повышением субструктурной однородности и является одной из основных причин повышения сопротивления пластической деформации и снижения склонности к хрупкому разрушению при возрастании эффективности действия сил межатомной связи [4]. Другая составляющая упрочнения связана с блокировкой дислокаций примесными атомами и их атмосферами (дислокационно-диффузионная релаксация). В результате повышаются стартовые напряжения сдвига. При этом в подповерхностных областях, деформируемых макроупруго без существенного изменения плотности дислокаций, действует механизм динамического дислокационно-диффузионного упрочнения (ДДУ) [7], а в областях, подверженных микротекучести, с ростом плотности дислокаций развиваются родственные процессы динамического деформационного старения (ДДС), повышающие ударную вязкость [8]. Следовательно, при повышенной скорости трения минимизация износа углеродистой нормализованной стали связана с проявлением трех релаксационно-упрочняющих факторов: диффузионно-дислокационной релаксации (релаксационное ВТ), магнитомеханической релаксации (магнитоупругий гистерезис), ДДУ и ДДС (блокировка дислокаций атмосферами атомов внедрения).

При малых скоростях трения и невысоких контактных температурах основной вид деформационного упрочнения нормализованной стали – механический наклеп с охрупчиванием. В этом случае существенно ухудшаются условия для релаксации напряжений вследствие взаимной блокировки дислокаций, низкой их подвижности, а также из-за малой диффузионной подвижности точечных дефектов. Поэтому появляются опасные пиковые напряжения, релаксация которых становится возможной только за счет хрупкого разрушения или схватывания (релаксация при образовании металлических связей с более устойчивыми электронными конфигурациями).

При трении закаленной стали (рис. 5, б) вследствие структурной метастабильности с высокой концентрацией подвижных дислокаций и вакансий даже при малых скоростях трения и низких температурах вследствие раннего проявления мартенситом микротекучести, происходит интенсивная релаксация напряжений. При этом повышается структурно-деформационная однородность и сопротивляемость хрупкому разрушению. Формируется такое соотношение плотности закрепленных и подвижных точечных и линейных структурных дефектов, которое проявляется в оптимальном сочетании высокой сопротивляемости пластической деформации и релаксационной способности. За счет высокого дислокационного внутреннего трения диссипация механической энергии сопровождается релаксацией напряжений со снижением динамической напряженности фрикционного контакта. С повышением скорости и соответствующей температуры трения до 150 - 300 °С интенсификация диффузионно-дислокационной и структурной релаксации сопровождается упрочнением вследствие динамического старения мартенсита (отпуск под напряжением), когда выделяющиеся высокодисперсные карбидные частицы повышают сопротивление микропластическим деформациям и одновременно благоприятно влияют на релаксационную способность, способствуя генерации свежих дислокаций [9].

Таким образом, при умеренных скоростях (до $V = 2$ м/с) трения закаленной стали протекают следующие релаксационно-упрочняющие процессы:

- микродвиговая релаксация, обусловленная смещением дислокаций в энергетически более выгодные места;
- диффузионная релаксация вследствие перераспределения точечных дефектов (вакансий, атомов внедрения) в поле действующих напряжений (релаксация Сноэка);
- структурная релаксация, или динамическое старение (распад пересыщенного твердого раствора с выделением мелкодисперсных карбидов, частично блокирующих дислокации).

При более высоких скоростях и температурах трения вследствие перестаривания сталь охрупчивается, теряя сопротивляемость износу [10].

На рис. 6 приведены температурные зависимости износа (Z) и коэффициента трения (μ), которые сопоставлены с соответствующими изменениями твердости подповерхностного слоя (HV) при трении высокопрочного чугуна ВЧ 50-2 [11]. Трибологические испытания проводились по схеме «ролик-колотка». Материал ролика – серый чугун СЧ 25. В зону трения подогретое масло подавалось в результате окунания в него вращающегося ролика. В условиях граничного трения адгезионно-сдвиговые процессы минимизируются, а наблюдающийся рост коэффициента трения с повышением температуры, очевидно, обусловлен температурной зависимостью декремента колебаний, характеризующего объемное внутреннее трение ($\delta = \pi \cdot \text{tg}\varphi_v$). Материалы пар трения с ростом температуры проявляют значительное повышение сопротивляемости износу, что обеспечивается развитием релаксационно-упрочняющих процессов типа ДДУ и ДДС. Об этом свидетельствует и рост твердости при повышении температуры испытаний.

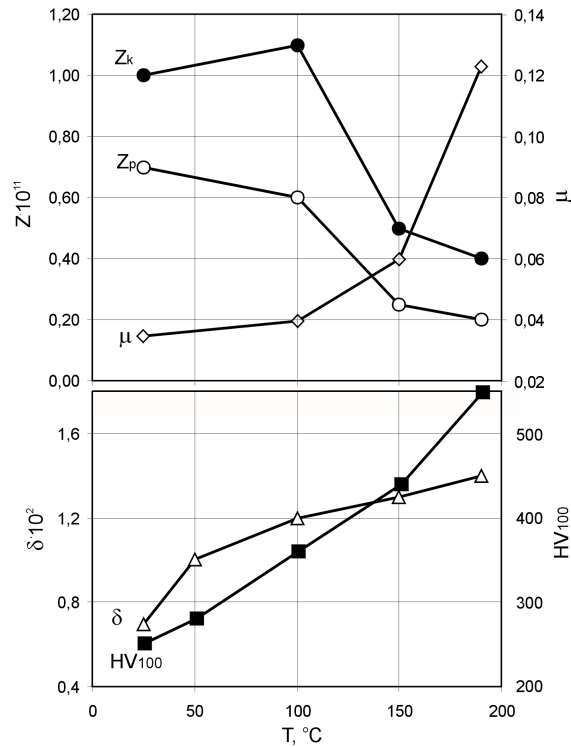


Рис. 6 – Температурные зависимости износа ролика (z_p), колодки (z_k), коэффициента трения (μ) и микротвердости колодки (HV), а также логарифмического декремента колебаний ($\delta = \pi \text{tg}\varphi_v$) чугуна ($P = 4$ МПа, $v = 1$ м/с)

Другой пример снижения интенсивности изнашивания при росте коэффициента трения в условиях фреттинга приведен на рис. 7. Вследствие вовлечения в передоформирование более глубоких объемов при вибрационном взаимодействии изменение коэффициента трения с ростом температуры испытаний коррелирует с изменением внутреннего трения, формирующего деформационный пик Кестера в районе 250 °С. Одновременно развивающийся процесс динамического деформационного старения повышает сопротивление износу.

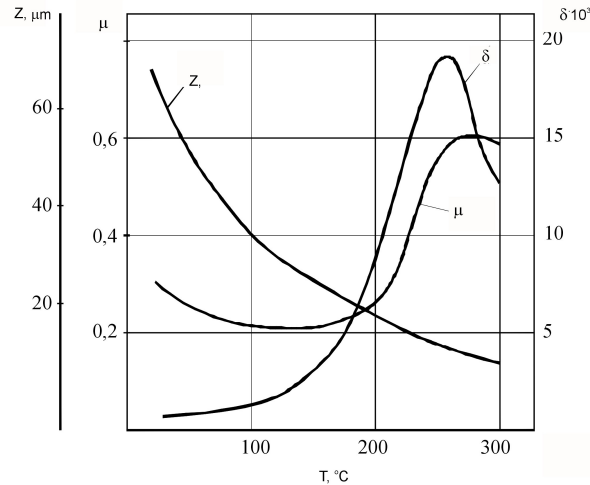


Рис. 7 – Влияние температуры на линейный износ (z) и коэффициент трения (μ) при фреттинг-коррозии стали 20X13, а также температурная зависимость логарифмического декремента колебаний (δ) стали ($A=50$ мкм, $f=30$ Гц, $N_\phi=5 \times 10^5$ циклов)

Износостойкость трибосистемы определяется соотношением между механическими потерями, преобразованными в теплоту, и долей запасенной энергии, превышение критического уровня которой вызывает локальное разрушение. Рост объемного внутреннего трения обеспечивает динамическую релаксацию напряжений с выделением теплоты, а сопряженные субструктурные изменения при ДДС обеспечивают повышение критического уровня скрытой энергии (рис. 8).

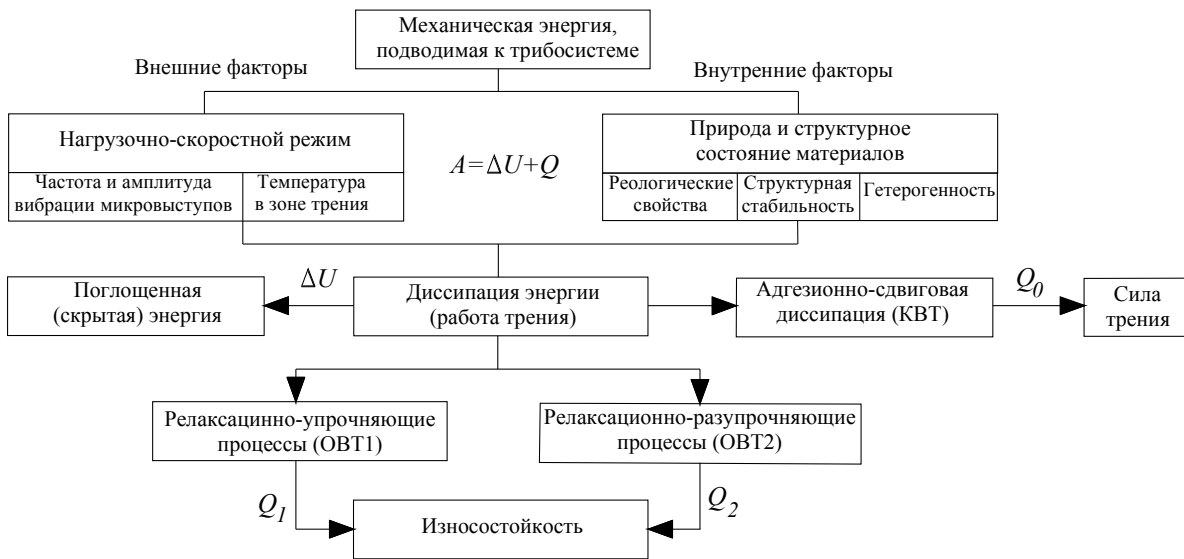


Рис. 8 – Классификация диссипативных процессов при трении, формирующих силу трения и износостойкость трибосистемы (КВТ – контактное внутреннее трение, ОВТ – объемное внутреннее трение, ΔU – изменение внутренней энергии, теплота диссипации $Q = Q_0 + Q_1 + Q_2$)

Уравнение первого начала термодинамики в применении к трибосистемам без учета механо-эмиссионных и трибохимических явлений можно записать в следующем виде:

$$A = \Delta U + Q, \quad (28)$$

где A – работа трения, равная диссипированной механической энергии;

ΔU – изменение внутренней (скрытой) энергии трибосистемы;

Q – полная теплота диссипации.

Полную теплоту диссипации при трении можно представить суммой:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2, \quad (29)$$

где Q_0, Q_1, Q_2 – теплоты диссипации, обусловленные соответственно контактным внутренним трением, объемным неповреждающим внутренним трением и релаксационно-повреждающими процессами, вызывающими образование новых поверхностей раздела и продуктов износа.

В общем случае энергетический баланс при безыносном трении отвечает следующему условию ($Q_2 = 0$):

$$A = \Delta U_i + (Q_0 + Q_1). \quad (30)$$

Составляющая $\Delta U_i = U_i - U_0$, т. е. является разностью между текущей приобретенной скрытой энергией U_i и исходной U_0 .

Поверхностное разрушение получает развитие при достижении скрытой энергией критического уровня $U_i = U_k$. Следовательно, процесс изнашивания начинается при условии:

$$A > \Delta U_k + (Q_0 + Q_1). \quad (31)$$

С энергетической точки зрения износостойкость трибосистемы обеспечивается выполнением следующих требований:

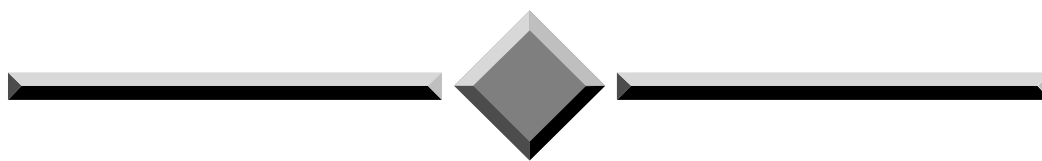
$$\begin{aligned} U_k, Q_1 &\rightarrow \max, \\ \Delta U_i, Q_0, Q_2 &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

Таким образом, реологические свойства фрикционного контакта определяют действующие механизмы и уровень внутреннего трения, оказывая тем самым решающее влияние на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев и, в конечном счете, на износостойкость трибосопряжения.

Литература

1. Крагельский И.В. Трение и износ. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Рейнер М. Реология. – М. : Наука, 1965. – 224 с.
3. Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения. // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 48-62.
4. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости / В.В.Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельницкий : ХНУ, 2006. – 278 с.
5. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. - М. : Металлургия, 1969. – 332 с.
6. Криштал М.А. Внутреннее трение и структура металлов / М.А. Криштал, С.А. Головин. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
7. Гиндин И.А. Физика программного упрочнения / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов. - К. : Наукова думка, 1979. - 182 с.
8. Бабич В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.Л. Гуль, И.Е. Долженков. - М.: Металлургия, 1972. - 320 с.
9. Пастухова Ж.П. Динамическое старение стали / Ж.П. Пастухова, А.Г. Рахштадт, Ю.А. Каплун. – М. : Металлургия, 1985. – 222 с.
10. Шевеля В.В. Структурно-реологические механизмы снижения динамической напряженности и деформационного упрочнения фрикционного контакта / В.В. Шевеля, А. Трытек, В.П. Олександренко, М. Швед, Ю.С. Соколан // Проблемы трибологии. – 2010. - № 1. – С. 6-15.
11. Шевеля В.В. Влияние диссипативных процессов на трибологические параметры фрикционных сопряжений / В.В. Шевеля, Л.П. Клименко, А. Трытек // Archives of foundry engineering. V. 7, Issue 1, 2007, P. 77-80.

Надійшла 07.07.2010



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>