

УДК 621.891

В.В. ШЕВЕЛЯ

Жешувский Технический Университет

Ю.С. СОКОЛАН

Хмельницкий Национальный Университет

РЕОЛОГИЯ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ В СВЯЗИ С ВЛИЯНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА

Исследовано влияние температуры отпуска закаленной углеродистой стали и соответствующих структурных изменений на физико-механические свойства и трибологические показатели при трении скольжения без смазки. Показано, что соотношение между адгезионной и деформационной составляющими силы трения зависит от приобретенных при отпуске вязкоупругих свойств, влияющих на механизм контактного взаимодействия и диссипативные процессы. Вязкоупругие свойства определяются двумя основными реологическими параметрами: модулем упругости и демпфирующей способностью, с которыми связан коэффициент вязкости. Проведен теоретический анализ диссипативных свойств вязкоупругого фрикционного контакта в зависимости от структуры отпуска стали на основе рассмотрения стандартных реологических моделей.

Ключевые слова: Фрикционный контакт; Износостойкость; Коэффициент трения; Закалка; Отпуск; Реология; Релаксация; Внутреннее трение; Деформация; Напряжения; Вязкоупругость.

V.V. SHEVELYA

Rzeszow University of Technology

J.S. SOKOLAN

Khmelnytskyi National University

RHEOLOGY OF CONTACT PROCESSES DURING HARDENED STEEL IN CONNECTION WITH EFFECT OF TEMPERING TEMPERATURE

Abstract – Effect of the tempering temperature of hardened carbon steel and conformable structural changes on physical-mechanical properties and tribological characteristics during dry sliding friction was researched. It is shown, that relation between adhesive and deformational components of the frictional force depends on acquired during tempering viscoelastic properties that influence on mechanism of the contact interaction and dissipative processes. Viscoelastic properties are detected by two basic rheological parameters: modulus of elasticity and damping capacity, with which the viscoelastic coefficient is connected. The theoretical analysis of dissipative properties of the viscoelastic frictional contact dissected subject to the structure of tempered steel on the base of examined standard rheological models.

Keywords: Frictional contact; Wear resistance; Coefficient of friction; Hardening; Tempering; Rheology; Relaxation; Internal friction; Deformation; Tension; Viscoelasticity.

Введение

Эффективность преобразования трибосистемами подводимой механической энергии в тепло определяется степенью связи между внешним и внутренним трением. В зависимости от уровня действующих контактных напряжений и температуры процесс диссипации энергии осуществляется различными механизмами внутреннего трения при формировании адгезионной и деформационной составляющих внешнего трения.

Адгезионные и деформационные процессы, являясь основными инициаторами диссипации механической энергии при трении скольжения, протекают на разных масштабных уровнях и следуют разным реологическим законам [1]. Первый вид диссипации обусловлен контактным (адгезионно-сдвиговым) внутренним трением, а второй связан с объемным внутренним трением, вызванным несовершенной упругостью объемов, прилегающих к дискретным пятнам фактического контакта, которые подвергаются импульсному циклическому нагружению. Несмотря на то, что адгезионные и деформационные процессы следуют своим законам, они взаимосвязаны и описываются в единых терминах – деформациях и напряжениях. Очевидно, соотношение между адгезионной и деформационной составляющими силы трения зависит как от исходных реологических свойств контактирующих металлов, так и свойств, приобретенных в процессе контактного взаимодействия.

Методика исследования

Исследовалась термообработанная среднеуглеродистая сталь 50 (закалка в воду от температуры 850 °С с последующим отпуском в течение часа при температурах от 200 до 700 °С).

Твердость по Виккерсу и модуль упругости Юнга измерялись методом непрерывного вдавливания пирамиды Берковича на установке OPX NHT/NST фирмы CSM Instruments (Швейцария). Скорость нагружения и разгрузки равнялась 900 мН/мин.

Структурные изменения стали, вызванные термообработкой, исследовались методом

амплитуднозависимого внутреннего трения на установке типа крутильного маятника [2]. Показателем внутреннего трения служил логарифмический декремент колебаний образца.

Триботехнические испытания при трении скольжения без смазки проводились на машине трения TRIBOMETR (ТНТ) фирмы CSM Instruments по схеме «вращающийся диск (образец) – закрепленный шарик» (ШХ15, $HV_5 = 1050$). После термообработки рабочие поверхности образцов шлифовались и полировались. В процессе испытаний осуществлялась автоматическая запись силы и коэффициента трения. Износ пары трения оценивался по изменению массы образца и диаметра пятна износа шарика. Условия испытаний: нормальная нагрузка – 5Н, скорость трения – 0,2 м/сек, путь трения – 1000м.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждения

Изменение изучаемых физико-механических свойств стали в зависимости от температуры отпуска показано на рис. 1.

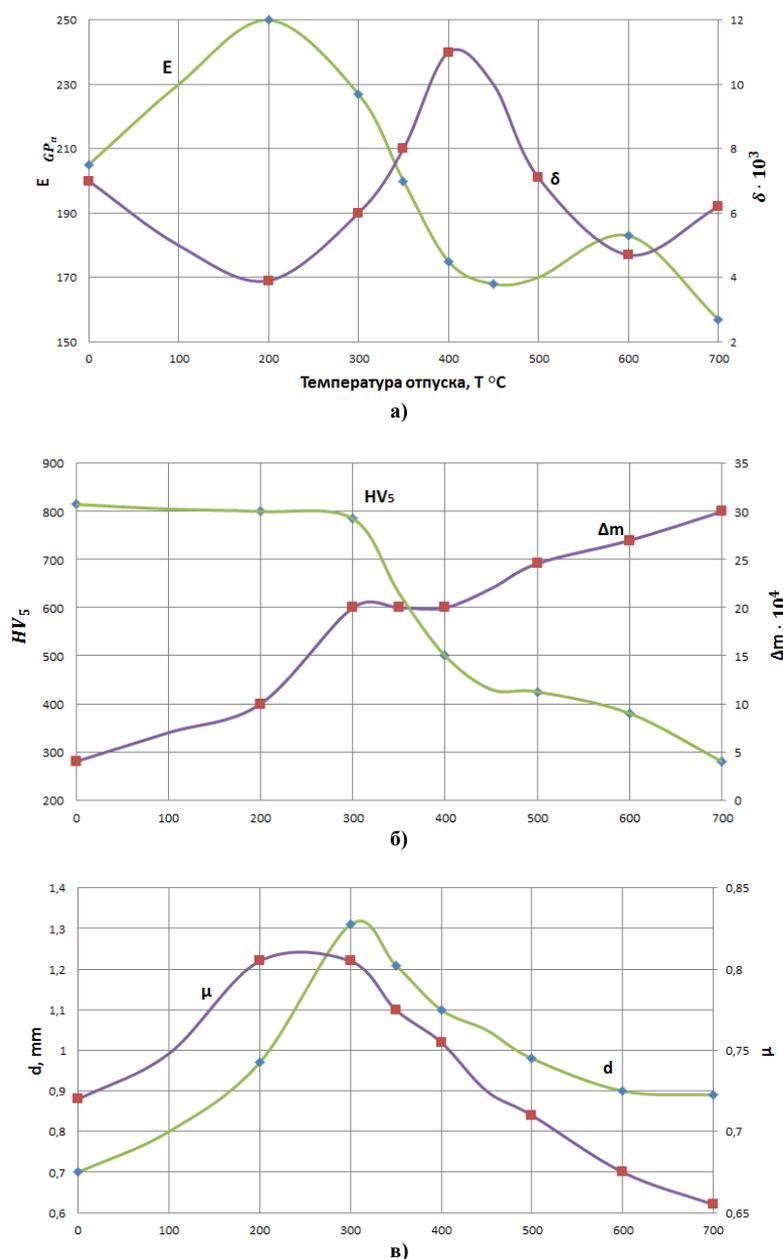


Рис.1. – Влияние температуры отпуска закаленной стали на физико-механические и триботехнические свойства.

а: E – модуль упругости; δ – логарифмический декремент колебаний;

б: HV₅ – твердость; Δm – весовой износ образца (диска);

в: d – диаметр пятна износа контртела; μ – коэффициент трения.

При монотонном снижении твердости (HV₅) с ростом температуры отпуска модуль упругости E стали изменяется циклически, формируя первый максимум в районе температуры отпуска 200...250 °C, а второй, менее выраженный максимум – в районе температуры 600 °C. Такой характер изменения модуля упругости обусловлен микроструктурными изменениями, формирующими упруговязкие реологические

свойства материала, влияющие и на амплитуднозависимое внутреннее трение (АЗВТ). Действительно, зависимость внутреннего трения (декремента колебаний δ) от температуры отпуска стали также имеет циклический характер, но в противофазе с изменением модуля упругости.

Уровень АЗВТ определяется структурной стабильностью стали и степенью подвижности дислокаций, которая зависит от блокирующего действия атомов примесей и карбидно-нитридных выделений, сопровождающих отпуск закаленной стали. После закалки сталь имеет относительно высокое внутреннее трение, т.к. мартенсит имеет большую плотность подвижных дислокаций, сформировавшихся в результате фазового наклепа. Сталь в таком состоянии при высокой твердости имеет значительную микропластичность. Повышение температуры отпуска до 200...250 °С вызывает существенное снижение внутреннего трения и рост упругости стали вследствие распада мартенсита с выделением высокодисперсных частиц метастабильного ϵ -карбида, когерентно связанного с матрицей (I превращение), а также распада остаточного аустенита ($\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha + \text{K}$) с образованием низкоуглеродистого мартенсита и дисперсных карбидов (II превращение) [3]. Дислокации закрепляются сегрегациями примесных атомов внедрения (C+N) и выделившимися частицами карбидов. Подвижность дислокаций уменьшается (минимум δ), структура стабилизируется, обретая высокую упругость и релаксационную стойкость (максимум E).

Рост внутреннего трения и снижение модуля упругости в диапазоне температур от 250...400 °С обусловлен ростом подвижности дислокаций вследствие значительного уменьшения концентрации углерода в твердом растворе из-за его перехода в карбиды. Этому способствует карбидное превращение (ϵ -карбид \rightarrow цементит), завершающееся образованием в районе температуры отпуска 400 °С высокодисперсной феррито-цементитной смеси – троостита отпуска (III превращение).

При температурах отпуска выше 400 °С пластинчатый феррит преобразуется в зернистый, формируя так называемый сорбит отпуска. При этом плотность подвижных дислокаций уменьшается и внутреннее трение падает, упругость подрастает. Новый рост внутреннего трения при температурах отпуска выше 550...600 °С обусловлен увеличением объема феррита, свободного от карбидов (вследствие коалесценции карбидных частиц), возрастанием пластичности феррита из-за обеднения его углеродом, а также ростом потерь на магнитомеханический гистерезис [4].

Влияние температуры отпуска стали на трибологические показатели изучаемой трибосистемы показано на рис. 1 б, в. Видно, что износостойкость термообработанной стали повышается с ростом твердости. При этом закалка, увеличивающая твердость стали в 3 раза, повышает ее износостойкость в 8 раз. Это связано как с упомянутой выше спецификой исходной мартенситной структуры закалки, так и с особенностями динамических процессов субструктурной перестройки при трении, сопровождающихся как дополнительным упрочнением, так и улучшением диссипативных (релаксационных) показателей.

Сталь в состоянии закалки (мартенсит) характеризуется структурной метастабильностью. При механо-термическом воздействии в условиях трения мартенсит претерпевает динамическое деформационное старение (ДДС), которое, как правило, упрочняет материал более эффективно, чем холодная деформация или обычное деформационное старение [5]. Росту эффективности упрочнения способствует и процесс отпуска под напряжением – динамического отпуска (ДО) [6], при котором ускоряется распад мартенсита (с образованием высокодисперсных карбидных частиц). С одной стороны, блокировка дислокаций атмосферами атомов внедрения и карбидными выделениями вызывает дополнительное упрочнение, а с другой – рост диффузионной подвижности атомов внедрения (C+N), а также процессы ДДС и ДО вызывают релаксацию пиковых контактных напряжений непосредственно в процессе трения.

В результате термообработки стали наблюдается синхронное изменение ее упруговязких свойств (E, δ) и трибологических показателей фрикционного контакта (μ , d). До температуры отпуска 400 °С коэффициент внешнего трения μ изменяется обратно пропорционально гистерезисному внутреннему трению δ и прямо пропорционально модулю упругости E.

Первоначальный рост упругости стали и стабильности субструктуры сопровождается снижением запаса микропластичности и потерей релаксационной способности, о чем также свидетельствует падение внутреннего трения δ . В таких условиях ведущими механизмами диссипации энергии и релаксации контактных напряжений становятся физико-химические процессы образования адгезионных связей, сопровождающиеся увеличением адгезионной (молекулярной) составляющей силы трения и уменьшением вклада в общую силу трения деформационной составляющей. Следовательно, наблюдаемые закономерности изменения коэффициента трения μ и изнашивающей способности d стали в первую очередь следует связывать с изменением упругости стали (E) и активизацией адгезионных процессов, максимум которых приходится на диапазон температур отпуска вблизи 250-300°С. Адгезия приобретает характер схватывания (микросварки) при дефиците неповреждающих процессов релаксации напряжений, реализуемых механизмами релаксационного или гистерезисного внутреннего трения [2]. Адгезия и схватывание выступают как форма структурной релаксации контактных напряжений при развитии топохимической реакции образования металлических связей на границе раздела. На жесткой упругой подложке защитные пленки вторичных структур неустойчивы и в процессе контактного взаимодействия разрушаются, что вызывает повышенную повреждаемость контртела. Как следствие, согласованный рост износа образца Δm , контртела d, а также коэффициента трения μ имеет место до температур отпуска 250-300°С. При более высоких температурах отпуска росту износа стали сопутствует снижение модуля упругости и коэффициента

трения с одновременным уменьшением износа контртела.

Таким образом, соотношение между адгезионной и деформационной составляющими силы трения зависит от вязкоупругих свойств фрикционного контакта, определяемых двумя основными реологическими параметрами материалов пары трения: модулем упругости и внутренним трением (демпфирующей способностью). При высоком модуле упругости и низком внутреннем трении менее жесткого элемента пары его изнашивающая способность и суммарная сила трения определяются преимущественно адгезионной составляющей; при росте внутреннего трения и снижении модуля упругости элементов трибосистемы повышается вклад деформационной составляющей, которая становится доминирующей на структурах стали, формирующихся при температурах отпуска, превышающих 400 °С.

Реология диссипативных процессов

При взаимодействии сопряженных поверхностей в условиях трения скольжения дискретные пятна фактического контакта подвержены вибрационному действию напряжений сдвига с убывающей вглубь от поверхности скоростью вязкоупругой деформации. Локализованный в приповерхностных слоях градиент сдвиговой деформации кроме силы упругости формирует силу внутреннего трения (силу Ньютона), обуславливающую диссипацию подводимой механической энергии [7]:

$$F_H = \eta \cdot \frac{dV}{dh} \cdot A, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость;

$\frac{dV}{dh}$ – градиент скорости деформации по глубине;

A – фактическая площадь контакта.

Следовательно, напряжение сдвига:

$$S = \frac{F_H}{A} = \eta \cdot \frac{dV}{dh} = \eta \cdot \text{grad } V \quad (2)$$

Коэффициент вязкости η связан с двумя реологическими показателями твердого тела – с модулем сдвига G и демпфирующей способностью δ , характеризующей внутреннее трение.

В качестве примера рассмотрим узлы трения машин, работающих без смазки, которые обычно играют роль звена, передающего усилия через фрикционный контакт (фрикционные муфты сцепления, тормозные устройства, фрикционные демпферы и амортизаторы и т. п.). В динамических моделях таких устройств следует рассматривать взаимодействие активных пятен фактического контакта с определенными вязкоупругими связями, реологические свойства которых зависят от структурного состояния стали.

Учитывая экспериментально наблюдаемый характер изменения вязкоупругих свойств стали при отпуске и соответствующих изменений трибологических показателей, в качестве динамических моделей, описывающих в первом приближении напряженно-деформированное состояние фрикционного контакта, рассмотрим вязкоупругие свойства реологических тел Максвелла и Кельвина-Фойгта [8].

Модель Максвелла (рис. 2) характеризует тело с идеальной вязкостью, в котором упругая деформация устанавливается мгновенно, и релаксационные свойства таковы, что материал не восстанавливает полностью свою первоначальную форму. Эту модель можно использовать для описания напряженного состояния фрикционного контакта материалов с повышенной упругостью, когда доминирует адгезионная составляющая трения (например, низко- и среднеотпущенная закаленная сталь при температурах менее 400°С).

Деформация и напряжение сдвига в модели Максвелла связываются следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\dot{s} + \frac{G}{\eta} \cdot s = G \cdot \dot{\varphi}, \quad (3)$$

где s – напряжение сдвига;

φ – относительная деформация сдвига;

η – динамическая вязкость;

G – модуль сдвига.

Напряженное состояние зон фактического контакта вызывается возникновением адгезионных и деформационных поверхностных связей. При действии в вязкоупругом теле периодически изменяющегося с частотой ω напряжения

$$S = S_0 \cdot e^{i\omega t}, \quad (4)$$

происходит диссипация энергии механических колебаний, т.к. при циклическом деформировании вязкоупругих тел напряжение S сдвинуто по фазе относительно деформации сдвига φ . В этом случае напряжение выражают через комплексный модуль сдвига G^* [7]:

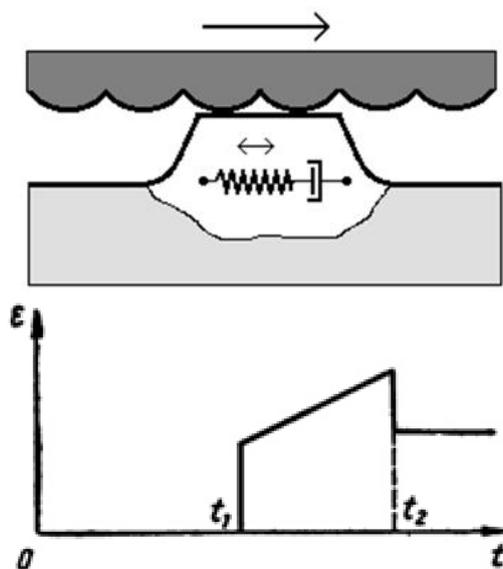


Рис. 2. Динамическая модель Максвелла

$$S = G^* \cdot \gamma \tag{5}$$

В свою очередь, G^* можно представить суммой:

$$G^* = G' + iG'' \tag{6}$$

где G' – действительная составляющая комплексного модуля, совпадающая по фазе с деформацией (динамический модуль сдвига);

G'' – мнимая составляющая, которая сдвинута относительно деформации на 90° (модуль механических потерь).

G' характеризует упругую энергию, запасаемую и отдаваемую единицей объема тела за цикл деформации, а G'' определяет ту часть энергии колебаний, которая превращается в теплоту, т.е. характеризует диссипацию подводимой механической энергии, обусловленную внутренним трением. Показателями внутреннего трения Q^{-1} служат тангенс угла сдвига фаз φ между напряжением и деформацией, а также логарифмический декремент колебаний δ [4]:

$$Q^{-1} = \tan \varphi = \frac{G''}{G'} = \frac{\delta}{\pi} \tag{7}$$

После подстановки (4) в (3) и последующего интегрирования получим связь между амплитудными значениями напряжения S_0 и относительной деформации сдвига γ_0 :

$$S_0 = \frac{iG \cdot \omega \cdot \eta}{G + i\omega\eta} \cdot \gamma_0 = G^* \cdot \gamma_0 \tag{8}$$

где G^* – комплексный модуль сдвига, преобразуя который, с учетом (6), получим:

$$G^* = \frac{G(\omega\eta)^2}{G^2 + (\omega\eta)^2} + i \frac{G^2\omega\eta}{G^2 + (\omega\eta)^2} = G' + iG'' \tag{9}$$

В соответствии с (7) находим выражение для внутреннего трения:

$$Q^{-1} = \frac{G''}{G'} = \frac{G}{\omega\eta} \tag{10}$$

Откуда коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{G}{\omega Q^{-1}} = \frac{\pi \cdot G}{\omega \cdot \delta} \tag{11}$$

где ω – частота вибрации, зависящая от скорости трения и геометрической структуры поверхностей контакта.

С учетом (11) и (2) выражение для напряжения разрушения адгезионных связей приобретает вид:

$$S_T = \frac{\pi \cdot G}{\omega \cdot \delta} \cdot \text{grad } V \tag{12}$$

Если σ_n – нормальное давление в контакте, то адгезионная составляющая коэффициента трения равна:

$$\mu_a = \frac{S_a}{\sigma_n} = \frac{\pi}{\sigma_n} \cdot \frac{G}{\omega \cdot \delta} \cdot \text{grad } V \tag{13}$$

Таким образом, при прочих равных условиях (при данной скорости и нагрузке трения и одинаковых параметрах микрошероховатости) адгезионная составляющая коэффициента трения пропорциональна модулю сдвига элементов фрикционного контакта и обратно пропорциональна демпфирующей способности (уровню внутреннего трения).

Связь между физико-механическими свойствами стали, отпущенной при температурах более 400 °С, и ее трибологическими показателями можно описать с помощью реологической модели Кельвина-Фойгта (рис. 3), которая характеризует способность вязкоупругих тел релаксировать напряжения в условиях ползучести. Эта модель может быть применена для описания деформационного (гистерезисного) внешнего трения, когда напряженное состояние поверхностей фрикционного контакта и коэффициент трения изменяются в соответствии с изменением внутреннего трения менее жесткого элемента пары трения.

Для тела Кельвина-Фойгта полное напряжение сдвига равно:

$$S = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{14}$$

Пусть деформация γ является периодической функцией времени:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{i\omega t} \tag{15}$$

После подстановки (15) в (14) и интегрирования получим связь между амплитудными значениями напряжения и деформации:

$$S_0 = (G + i\omega\eta) \gamma_0 = (G' + iG'') \gamma_0 \tag{16}$$

На основании (6), (7) и (16) находим внутреннее трение:

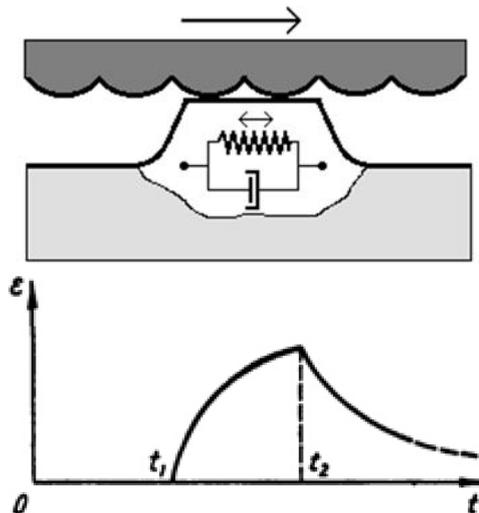


Рис. 3. Динамическая модель Кельвина-Фойгта

$$Q_{\bar{F}}^{-1} = \frac{G''}{G'} = \frac{\omega \eta}{G} \quad (17)$$

Откуда коэффициент вязкости:

$$\eta = \frac{G \cdot Q_{\bar{F}}^{-1}}{\omega} = \frac{G \cdot \delta}{\pi \cdot \omega} \quad (18)$$

Выражение для напряжения сдвига в формуле (2) принимает вид:

$$S_d = \eta \cdot \text{grad } V = \frac{G \cdot \delta}{\pi \cdot \omega} \text{grad } V \quad (19)$$

Следовательно, деформационный коэффициент трения:

$$\mu_d = \frac{S_d}{\sigma_n} = \frac{G \cdot \delta}{\pi \sigma_n \cdot \omega} \cdot \text{grad } V \quad (20)$$

Откуда следует, что деформационная составляющая коэффициента трения (при мало меняющемся модуле сдвига) изменяется пропорционально внутреннему трению.

Таким образом, напряженное состояние и диссипативные свойства фрикционного контакта определяются преимущественно соотношением двух реологических параметров – модуля сдвига и внутреннего трения (демпфирующей способности). Это соотношение определяет относительный вклад в суммарный коэффициент трения адгезионной и деформационной составляющих, зависящей, в свою очередь, от структурного состояния стали. Другими словами, изменяется реология контактного взаимодействия и соответствующих диссипативных процессов.

Выводы

Установлена взаимосвязь между амплитуднозависимым (гистерезисным) внутренним трением, модулем упругости и коэффициентом внешнего трения в зависимости от температуры отпуска закаленной стали. До температуры отпуска ~ 400 °С коэффициент трения определяется преимущественно его адгезионной составляющей (μ_a), величина которой изменяется обратно пропорционально гистерезисному внутреннему трению (δ) и прямо пропорционально модулю сдвига (G). После отпуска стали при температурах более 400 °С ведущую роль приобретает деформационная составляющая внешнего трения, которая изменяется прямо пропорционально внутреннему трению (при мало изменяющемся модуле сдвига).

Корреляции между коэффициентом трения и износом термообработанной стали отсутствует, в то же время ее изнашивающая способность изменяется пропорционально коэффициенту трения.

Износостойкость и антифрикционность стали определяются разными физико-механическими свойствами. Износостойкость зависит от макроскопических показателей прочности и пластичности (твердость), а коэффициент трения, характеризующий интенсивность диссипативных процессов, формируется преимущественно реологическими показателями вязкоупругости и микропластичности, которые контролируют релаксационные свойства.

Напряженное состояние макроупругого фрикционного контакта, связанное с силой трения, обуславливается преимущественно реологическими свойствами пары трения, формирующими в сопряжении адгезионно-деформационные связи.

Литература

1. Шевеля В.В., Трытек А.С. Реология вязкоупругого фрикционного контакта// Проблемы трибологии. – 2010 – №4 – с. 5-15.
2. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницький, 2006. – 278 с.
3. Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращения при отпуске стали. – М.: Металлургия, 1973. – 231 с.
4. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1969. – 332 с.
5. Бабич В.Г., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
6. Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г., Каплун Ю.А. Динамическое старение сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 222 с.
7. Мур Д. Основы применения трибоники. – М.: Мир, 1978. – 478 с.
8. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

References

1. Shevelya V.V., Trytek A.S. Rheology of viscoelastic frictional contact // Problems of tribology. – 2010 – №4 – p. 5-15.
2. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. Tribochemistry and rheology of wear resistance. – Khmelnytskyi, 2006. – 278 p.
3. Belous M.V., Cherepin V.T., Vasiliev M.A. Transformation during tempering of steel. – M.: Metallurgy, 1973. – 231 p.
4. Postnikov V.S. Internal friction in metals. – M.: Metallurgy, 1969. – 332 p.
5. Babich V.G., Gul Y.P., Dolzhenkov I.E. Deformational aging of steel. – M.: Metallurgy, 1972. – 320 p.
6. Pastuhova G.P., Rachshadt A.G., Kaplun Y.A. Dynamical aging of alloys. – M.: Metallurgy, 1985. – 222 p.
7. Mur D. Basics of using of tribonics. – M.: World, 1978. – 478 p.
8. Rainer M. Rheology. – M.: Science, 1965. – 224 p.