

Шевеля В.В.,*
Олександренко В.П.,**
Калда Г.С.**

*Жешувская политехника,
г. Жешув, Польша,

**Технологический университет
Подолья,
г. Хмельницкий, Украина

О РОЛИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И СУБСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ТРЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Трение и износ происходит при динамическом контактном взаимодействии твердых тел. При этом динамическая напряженность зоны контакта определяется не столько макропоказателями материалов пары трения, сколько релаксационными свойствами их поверхностных слоев и протекающими в них неупругими явлениями [1]. Диссипация подводимой механической энергии связана с физическими и химическими явлениями, происходящими как в тонкой структуре металла, так и при его взаимодействии с окружающей средой.

Одним из внешних факторов, наиболее влияющим на процесс трения и изнашивания, является скорость скольжения. Известно, что зависимость износа от скорости скольжения имеет сложный характер с участками высокой и низкой износостойкости. Эти результаты нельзя объяснить только, например, теорией окислительного изнашивания [2], учитывая, что, с одной стороны, на сложнотермически обработанных и закаленных материалах эффект минимизации окислительного изнашивания не проявляется, с другой – может проявляться при отсутствии окислительной среды, и, кроме того, сложно интерпретировать проявление участка первичной минимизации износа при низких скоростях скольжения перед пиком максимального износа, вызванного схватыванием I-го рода.

Независимо от механизма изнашивания (усталостного, адгезионного и т.д.) поверхностное (или подповерхностное) разрушение, как правило, начинается в местах концентрации напряжений. Следовательно, факторы, обуславливающие износостойкость, должны обеспечивать деконцентрацию контактных напряжений, поверхностную локализацию и однородность деформации. Другими словами, состояние износостойкости тесно связано с реологическими (релаксационными) свойствами трибосистемы [3]. Подводимая при внешнем трении механическая энергия передается в материал трибоземента посредством волн деформаций-напряжений, трансформируясь во внутренне трение (ВТ), которое обусловлено неупругими явлениями и характеризует способность твердого тела необратимо рассеивать энергию механических колебаний, превращая ее в теплоту [4]. Механизмы диссипации энергии (внутреннего трения), по существу, являются динамическими механизмами релаксации напряжений, возникающих в приповерхностных слоях трибоземента. Релаксация напряжений в зонах контакта, обусловленная высоким ВТ, приводит к более равномерному перераспределению напряжений по объему и предотвращает необратимое накопление дефектов, вызывающее концентрацию напряжений. Поэтому чем большая доля подводимой при трении механической энергии рассеивается в форме теплоты, тем выше должна быть износостойкость сопряжения. Учитывая, что температурная и амплитудная зависимости внутреннего трения твердых тел часто имеют экстремальный характер, следует ожидать, что при увеличении температуры, скорости трения или нормальной нагрузки до уровней, соответствующих тому или иному пику ВТ, будет наблюдаться снижение износа. Действительно, эффект минимизации износа в определенном нагрузочно-скоростном диапазоне трения или резания является общим свойством конструкционных и инструментальных материалов [2, 3].

Типичными процессами механической релаксации в ОЦК-металлах (релаксационного ВТ) являются: релаксация Сноэка (РС), релаксация Кестера (РК) и зернограничная релаксация (РЗГ) [4, 5]. Пик внутреннего трения Сноэка связан с диффузией атомов внедрения (углерод, азот) в поле напряжений ОЦК-металлов при циклической деформации, когда изменение деформаций, вызванных перераспределением атомов в поле напряжений, запаздывает по отношению к изменению напряжений. Пик Кестера (деформационный) является результатом взаимодействия дислокаций, возникающих при пластической деформации металла, с примесными атомами внедрения. Внутреннее трение (релаксация) при этом обуславливается вызванной напряжением переориентацией атомов внедрения в упругом поле дислокаций или движением под действием внешней периодической силы дислокаций, которые тянут за собой атмосферы из атомов внедрения. Эффекты зернограничной релаксации отображают вязкое течение по поверхностям и субповерхностям раздела, а также подвижность вакансий и атомов в приграничных областях. При совпадении периода деформации со временем релаксации процесса миграции между границей и объемом зерна наблюдается максимальное рассеяние энергии колебаний – появляется пик внутреннего трения.

Для изучения указанных явлений, выявления механизма происходящих процессов были проведены исследования по влиянию скорости скольжения без смазки на характеристики трения и изнашивания сталей с различной термообработкой (то есть отличающимися реологическими свойствами поверхности) в средах различной окислительной способности.

На первом этапе исследования проводились на модернизированной установке КИИГА-2 по схеме 3 шара-диск. Путь трения составлял $S = 1700\text{ м}$, осевая нагрузка $P_{oc} = 60\text{ Н}$. Пара трения была изготовлена из стали ШХ15 (шары) и стали Ст3 (диск) и помещалась в герметичной камере. Регулирование содержания кислорода проводили продувкой камеры аргоном, воздухом или чистым O_2 . Контроль состава газовой среды осуществляли с помощью хроматографа «Газохром-3101». Установка была сконструирована таким образом, что варьирование скорости скольжения осуществлялось изменением радиуса установления шаров от центра вращения при сохранении постоянной частоты вращения [6]. Этим достигалось постоянство важного трибохимического параметра – времени контактирования материала дорожки трения диска со средой между актами соприкосновения с шарами ($t_{конт} = 0,074\text{ с} = \text{const}$) при различных линейных скоростях. $t_{конт}$ влияет на полноту протекания трибохимической реакции. В большинстве испытаний регулирование скорости скольжения достигается варьированием угловой скорости, но при этом происходит и изменение $t_{конт}$, что не учитывается. Температура измерялась термопарой, установленной на расстоянии 0,5 мм от поверхности трения.

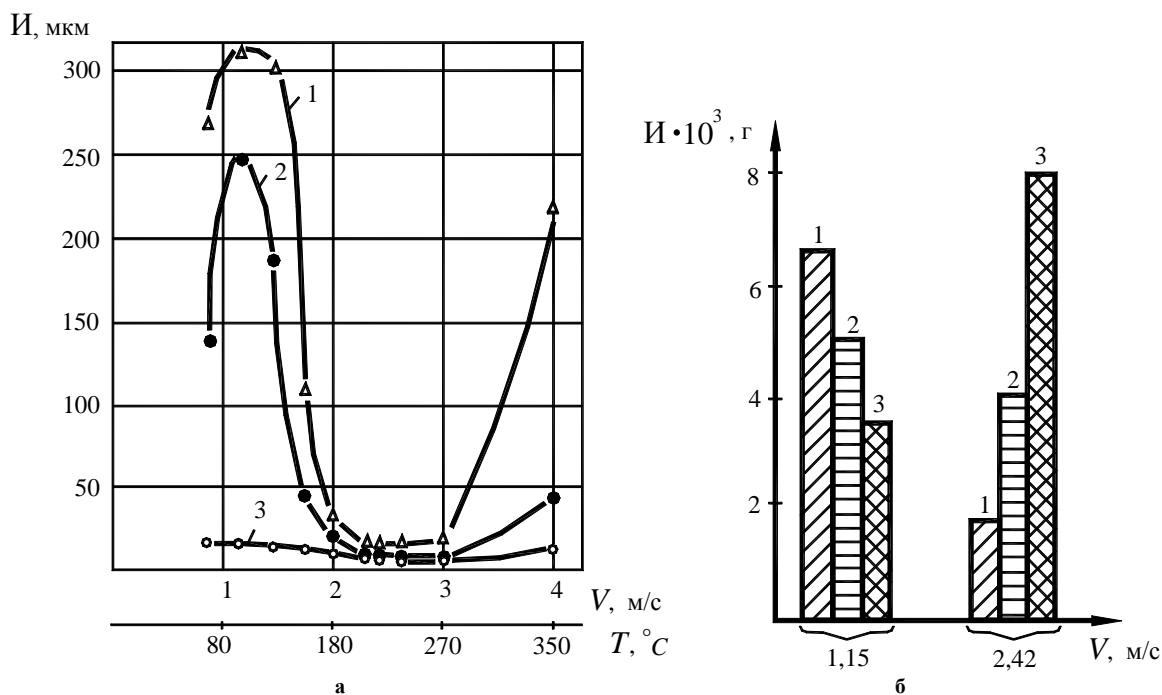


Рис. 1 - Зависимость износа диска (а) и шаров (б) от скорости скольжения для пары трения шар-плоскость, материал, соответственно, Ст3-ШХ15 ($P_{oc}=60\text{ Н}$) в среде: 1 - аргона; 2 - воздуха; 3 - кислорода

Видно (рис.1 а), что износ диска из стали Ст3 имеет экстремальный характер, особенно в среде аргона и воздуха. При низких скоростях скольжения ($V < 1\text{ м/с}$) износостойкость высокая, с увеличением скорости до $V = 1,15\text{ м/с}$ значительно падает, при дальнейшем повышении скорости до $V = 2 \dots 3\text{ м/с}$ резко (порядка 20 раз) возрастает и при повышенных скоростях опять падает.

С возрастанием окислительной способности среды в порядке: аргон, воздух, кислород при низких и повышенных скоростях скольжения износ диска снижается. Это указывает на то, что в случае неспособности металла, за счет реологических свойств, сопротивляться развитию повреждающего релаксационного явления – схватывания, существенное влияние на диссипацию подводимой механической энергии и на износостойкость металла оказывают химические релаксационные явления. Однако есть диапазон скоростей в районе $2 \dots 3\text{ м/с}$, когда температура поверхности достигает $200 \dots 300^\circ\text{ С}$, в пределах которой независимо от среды, износ диска минимизируется. Это связано с реологическими свойствами материала при данных температурно-скоростных условиях трения и указывает на преобладающее влияние в указанных условиях не химических, а специфических физико-механических процессов, происходящих в подвижном элементе трибосистемы (диске).

Уменьшение износа шаров (рис. 1 б) с увеличением содержания в камере кислорода при скорости $V = 1,15$ м/с объясняется тем, что при этой скорости развиваются повреждающие процессы релаксации: химическая реакция в твердой фазе – схватывание. Увеличение парциального давления O_2 приводит к возрастанию скорости гетерохимической реакции окисления [8]. Это способствует более интенсивному образованию между контактирующими поверхностями твердых продуктов триборекции – окисных пленок, разьединению ювенильных поверхностей и снижению износа как шаров, так и диска.

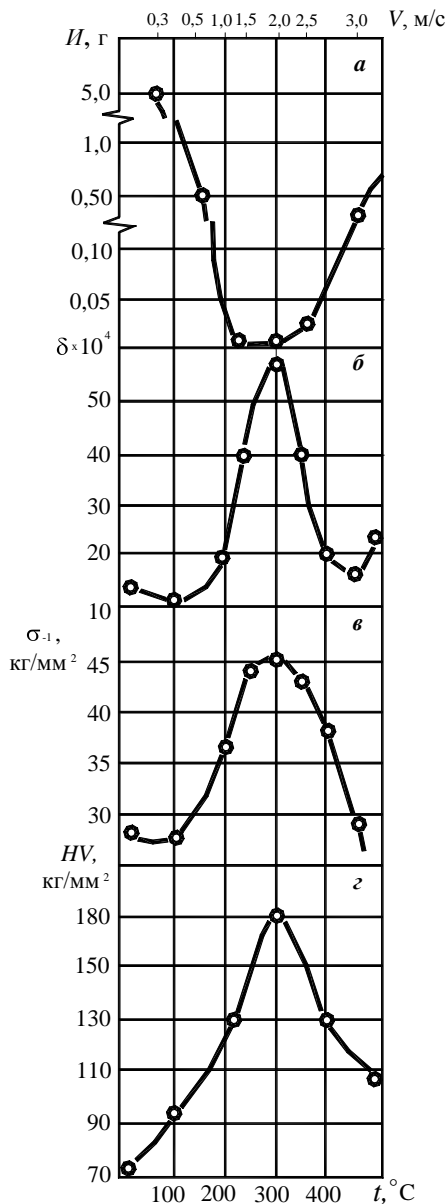


Рис. 2 - Сопоставление зависимостей для стали 20: а - износа от скорости трения и соответствующей контактной температуры; б - внутреннего трения от температуры испытаний; в - предела усталости от температуры испытаний; г - твердости от температуры деформации

поверхности появляется окисная пленка характерного синего цвета побежалости [12].

Для развития ДДС необходимо выполнение трех условий [12]:

- создание пластической деформацией свободных дислокаций;
- наличие атомов примесей в твердом растворе (углерод и азот);

При скорости скольжения $V = 2,42$ м/с реологически поверхность диска ведет себя более благоприятно, удерживая на своей поверхности окисную пленку. Увеличение в среде содержания кислорода способствует росту вероятности образования на дорожке трения высшего окисла железа – гематита Fe_2O_3 . Этот окисел имеет повышенную твердость и хрупкость [2] в сравнении с низшими окислами FeO и Fe_3O_4 , которые образуются при меньших парциальных давлениях кислорода. Формирующиеся на поверхности диска окислы Fe_2O_3 ведут себя как абразив, что приводит к росту износа шаров.

Таким образом, при трении в режиме повреждения 1-го рода (в нашем случае при $V = 1,15$ м/с) износ и изнашивающая способность диска уменьшается с ростом химической активности газовой среды. В режимах, когда износ диска не зависит от окислительной активности среды, его изнашивающая способность возрастает с ростом окислительной способности среды.

Полученные зависимости (рис. 1) можно объяснить с учетом изменения реологических и прочностных свойств стали в зависимости от температурно-скоростных условий динамического нагружения поверхностных слоев при трении [1,7,9]. На рис. 2 а представлены результаты триботехнических исследований стали 20 (ролик) в контакте со сталью 45 (вкладыш) в диапазоне скоростей 0,3...3 м/с в воздухе на установке 2070 СМТ-1. Видно, что при скоростях трения 0,3...1 м/с изнашивание стали 20 уменьшается и при температуре трения около $300^\circ C$ ($V = 1...1,5$ м/с) износо-стойкость возрастает в несколько десятков раз, в результате чего формируется участок минимального изнашивания на скоростной зависимости, отвечающий прохождению релаксации Кестера при указанной температуре (рис. 2 б).

Явление изменения механических свойств металлов при изменении температурно-скоростных условий испытания является характерным не только для трения. Аналогично, при исследовании влияния температурно-скоростных режимов деформации любого вида на сопротивление деформации технического железа и стали в определенном температурном интервале ($200...300^\circ C$) также наблюдается повышение прочности (рис. 2 в) и твердости (рис. 2 г) стали, обусловленное развитием динамического деформационного старения (ДДС) [10,11]. Характерно, что отклонение от монотонной температурной зависимости механических характеристик не сопровождается изменениями микроструктуры, которые могут быть выявлены под световым микроскопом. Только на

- обеспечение динамического (то есть в процессе деформации) взаимодействия между генерируемыми дислокациями и атомами примесей, что возможно только при определенных температурно-скоростных условиях деформации, когда скорость движения дислокаций соизмерима со скоростью диффузии атомов примесей.

Чем больше скорость деформации, тем при более высокой температуре проявляется эффект ДДС. Формирование дислокационной субструктуры во время ДДС происходит в условиях динамического блокирования дислокаций атомами примесей и скопления ранее заблокированных дислокаций. Поэтому деформация развивается в основном за счет генерации свежих дислокаций, и плотность дислокаций в процессе ДДС быстро увеличивается. Время прохождения ДДС невелико и считается долями секунды. Поэтому главным поставщиком атомов примесей для блокирования дислокаций является твердый раствор. Процесс ДДС завершается обычно образованием атмосфер или сегрегаций на дислокациях (без мелкодисперсных включений). Дислокационные сегменты между точками закрепления остаются частично подвижными, и сталь сохраняет достаточную пластичность. Температура, стимулирующая повышение диффузионной подвижности атомов примесей до уровня скорости движения дислокаций при данной скорости трения, совпадает с температурой возникновения окисной пленки. Упрочнение вследствие ДДС значительно повышает твердость, предел прочности, предел усталости и предел выносливости стали (рис. 2 в, г).

Во время старения деформируемой стали, на температурной зависимости внутреннего трения на участке 200...300° С (рис. 2,б) появляется деформационный максимум внутреннего трения (релаксация Кестера) [4, 13]. Известно [14], что чем больше высота и площадь пика Кестера, тем выше релаксационная способность материала. Во время ДДС происходит релаксация напряжений непосредственно в процессе деформации, вследствие чего возрастает энергоемкость стали, снижается динамическая напряженность поверхностей трения, уменьшается вероятность появления релаксационных трещин.

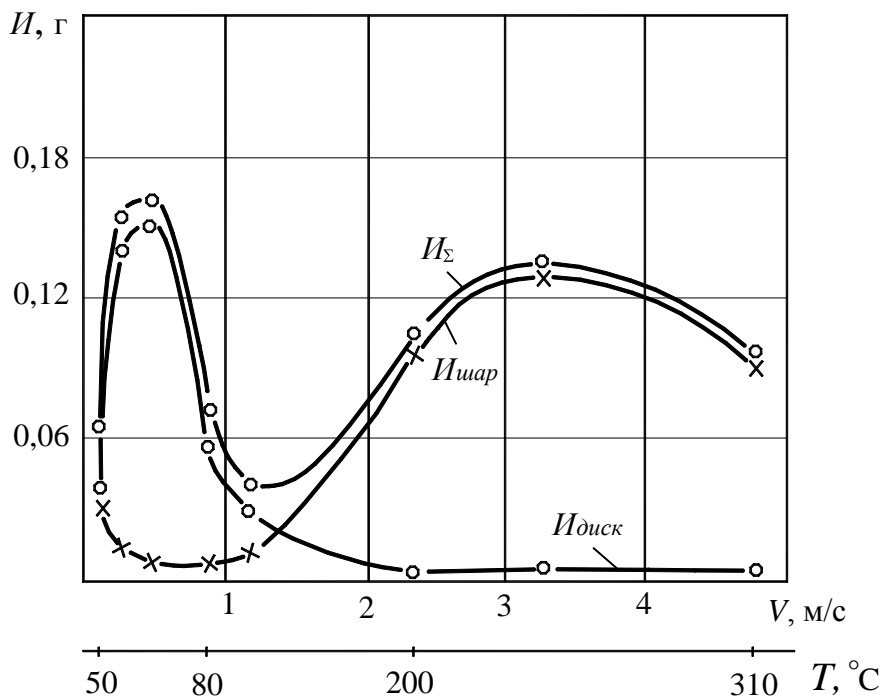


Рис. 3 - Зависимость износа от скорости скольжения для пары трения шар-плоскость, материал ШХ15-ШХ15 ($P_{oc} = 80\text{Н}$)

Таким образом, при определенной комбинации теплового и механического воздействия на сталь происходит термопластическое (субструктурное) упрочнение [5]. При этом формируется ячеистая структура в условиях развития динамического деформационного старения. Перераспределение дислокаций внутри субзерен (ячеек) как и генерирование дислокаций субграницами способствует релаксации пиковых локальных напряжений по механизмам гистерезисного и микропластичного ВТ, предотвращая хрупкое разрушение упрочненных объемов материала в определенном температурно-скоростном интервале механического нагружения. При снижении температуры деформации возрастает напряжение трения в решетке, что затрудняет поперечное скольжение и уменьшает вероятность

образования ячеистой структуры, а сам размер ячеек уменьшается, что приводит к снижению микропластичности и релаксационной способности поверхности трения. Следовательно, важными факторами увеличения износостойкости стали и снижения динамической напряженности поверхностей трения являются упрочнение вследствие ДДС и диссипация подводимой механической энергии за счет несовершенной упругости контактирующих материалов, то есть внутреннего трения, как проявления релаксационного процесса. Металлическая подложка в таком состоянии имеет наиболее благоприятные реологические свойства для сохранения на своей поверхности окисных пленок.

На важную роль релаксационных процессов, кроме эффекта упрочнения, указывают испытания закаленных сталей, которые несмотря на высокую твердость и прочность показывают низкую износостойкость при повышенных температурно-скоростных режимах трения.

Исследование влияния термообработки стали на ее износостойкость в зависимости от скорости скольжения проводили на паре трения 3 шара-плоскость, изготовленной из стали ШХ15. Термообработка шаров проводилась по технологии: нагрев до температуры 840...860° С, выдержка, закалка в 4...5 % водно-содовом растворе, температура которого составляла 30...35° С; диска (плоскости): нагрев до 830...840° С, выдержка, закалка в индустриальном масле И-20А, температура которого была 45...55° С. Регулирование скорости скольжения проводили изменением угловой скорости вращения.

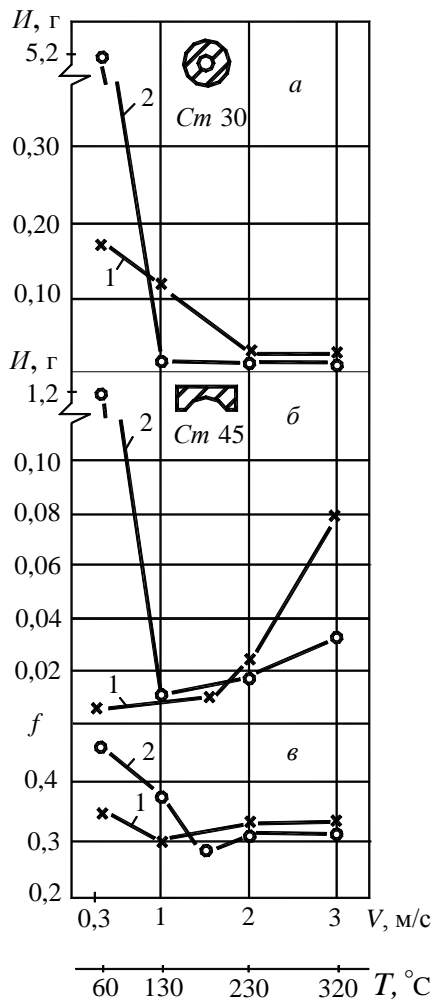


Рис. 4 - Зависимость изнашивающей способности (а), износа (б), коэффициента трения (в) стали 45 от скорости скольжения при $P = 1$ МПа: 1 - закалка; 2 - отпуск при 600° С

старения пика Кестера [7, 16].

Полученная зависимость износа диска от скорости скольжения по характеру близка нормализованной углеродистой стали с двумя участками высокой износостойкости, обусловленной пиками ВТ Сноэка и Кестера, соответственно при низких и повышенных скоростях. Такое поведение

На рис. 3 представлены результаты триботехнических испытаний. Необходимо подчеркнуть, что сталь после закалки в воду характеризуется повышенной структурной метастабильностью и, соответственно, повышенным внутренним трением структурно-дислокационной природы. Представляя собой доминирующий защитный механизм диссипации механической энергии при невысоких скоростях и температурах трения. Структурно-дислокационная релаксация предотвращает схватывание [1]. Что мы и видим на примере изнашивания шаров, термообработка которых представляет собой классический пример закалки с охлаждением в воде.

Относительная узость диапазона скорости, в котором износ шаров минимальный, связана с особенностями геометрии пары трения, в которой шар все время остается прикрытым диском, что ухудшает теплоотдачу и приводит к его более быстрому разогреву в процессе трения и быстротечному проявлению низкотемпературного диффузионного пика ВТ Сноэка (перераспределение атомов внедрения в поле действующих напряжений). Дальнейшее повышение скорости вызывает падение износостойкости шаров. Первопричиной резкого увеличения изнашивания закаленной стали при определенных температурно-скоростных условиях трения являются процессы динамического старения (ДС) (отпуск под напряжением), когда происходит распад пересыщенного твердого раствора (мартенсита) в поле напряжений, созданном внешним нагружением [15]. Это вызывает увеличение дисперсности карбидных включений, плотности их распределения, появление сегрегаций на «свежих» дислокациях. Динамическое старение, особенно при повышенных температурах, интенсивно влияет на субструктурные процессы, которые определяют увеличение сопротивления микропластическим деформациям (предела упругости), практически не изменяя сопротивления большим пластическим деформациям (твердость, временное сопротивление). При этом происходит стабилизация структуры стали, которая сопровождается резким снижением релаксационной способности (внутреннего трения), о чем свидетельствует уменьшение в процессе динамического

диска связано с более мягкой термообработкой материала по сравнению с шарами. Значительный интервал скоростей, в котором проявляется его высокая износостойкость обусловлен рядом факторов. Во первых, это связано с особенностями геометрии узла трения: точки поверхности диска только периодически входят в контакт с шарами, большую часть времени оставаясь открытыми, что способствует рассеиванию тепла, меньшему разогреву диска при увеличении скорости скольжения, и таким образом расширению интервала скоростей, при которых проявляется релаксационный максимум внутреннего трения Кестера. С другой стороны, увеличение скорости (частоты) нагружения приводит к смещению пика Кестера в сторону более высоких температур [13]. Этот процесс и реализуется при увеличении скорости скольжения вследствие возрастания частоты взаимодействия контактирующих поверхностей, повышения их температуры и соответственного смещения пика Кестера. Кроме того, известно, что значительный вклад в рассеивание энергии при циклическом деформировании ферромагнитных материалов (стали перлитного, ферритного, мартенситного классов) вносится магнитомеханическим гистерезисом (ММГ), который связан с необратимым смещением 90-градусных границ доменов. Вклад ММГ в диссипацию механической энергии увеличивается с ростом амплитуды циклической деформации и температуры отпуска [4].

Проведенные исследования закаленных и высокоотпущенных вкладышей из стали 45 в паре с роликами из стали 30 (рис. 4) подтверждают зависимость, полученные нами для сталей с разной термообработкой. Установлено, что при малых скоростях (0,3 м/с) износ закаленной стали 45 (рис.4,а) на два порядка меньше износа высокоотпущенной стали, а при повышенной скорости (3м/с), наоборот, закаленная сталь 45 изнашивается намного интенсивнее высокоотпущенной. При малых скоростях изнашивающая способность закаленной стали 45 (вкладыш) во много раз меньше таковой для высокоотпущенной стали (рис.4, б). При повышенных скоростях картина меняется на противоположную. Следовательно, диапазон скоростей скольжения, соответствующий минимизации износа, зависит от структурного состояния стали. Так, высокоотпущенная сталь, катастрофически изнашиваясь при малых скоростях трения, с ростом скорости при относительно небольшом изменении последней (0,5...1,0м/с) переходит в состояние высокого сопротивления изнашиванию, сохраняя это состояние в достаточно большом диапазоне скоростей (до 3...4м/с). Закаленная сталь, наоборот, при малых скоростях трения хорошо сопротивляется износу, однако с увеличением скорости износ резко возрастает, обычно приобретая экстремум.

С процессами релаксации связано и изменение коэффициента трения (рис. 4,в). В силу высокой релаксационной стойкости высокоотпущенной стали при малой скорости трения ведущим повреждающим процессом релаксации в этих условиях выступает схватывание, что приводит к повышению коэффициента трения.

Обобщенная взаимосвязь между релаксационными свойствами материала и его износостойкостью в зависимости от скорости скольжения и контактной температуры представлена на рис.5. Во время периодической деформации твердого тела при трении в нем нарушается термодинамическое равновесие и при определенной температуре и частоте нагружения возникают релаксационные процессы, приводящие к отставанию деформации от напряжения, вследствие чего значительная часть подводимой механической энергии в точках физического контакта необратимо рассеивается в виде тепла. Так, релаксация Кестера (РК), возникающая в сталях в районе температур 200...350°С, формирует пик внутреннего трения, который связан как с пластической деформацией, так и присутствием атомов углерода и азота. Возникновение указанного пика внутреннего трения обусловлено образованием атмосфер атомов внедрения (С+N) вокруг дислокаций, наведенных деформацией. Такая атмосфера препятствует изгибанию отрезка дислокаций до тех пор, пока атомы внедрения в состоянии мигрировать вместе с дислокацией, вызывая неупругость. Релаксация также может быть связана с переориентацией атомов внедрения в силовом поле дислокаций под действием созданных напряжений [4]. Высота пика возрастает с увеличением температуры закалки стали, деформации, температуры деформации и концентрации атомов внедрения. К тому же, с увеличением степени деформации температура пика может снижаться до 170...180°С. При введении в сталь легирующих карбидообразующих элементов (хром, вольфрам и др.) пик внутреннего трения смещается в сторону более высоких температур или же вовсе исчезает [4].

Релаксация - это самоподстройка системы во времени к новому равновесному состоянию в ответ на изменение внешнего параметра [17]. Если внешним изменяющимся параметром является напряжение, то установление во времени равновесного значения сопряженной переменной – деформации проявляется как неупругая (механическая) релаксация. Во время этого происходит подстройка к равновесному значению внутреннего параметра, через который совершается непосредственная связь между напряжением и деформацией. Релаксация указанного внутреннего параметра к равновесному значению обычно сопровождается процессами переноса. Когда, например, внутренний параметр характеризует степень упорядоченности сплава, то неупругость обусловлена миграцией атомов. Другими словами,

неупругая релаксация является термодинамическим свойством, обусловленным связью напряжения и деформации с параметрами, изменение которых может происходить вследствие кинетических процессов (например, диффузии). Сдвигающие напряжения при температуре ниже температуры пика ВТ не вызывают эффективного движения дислокаций вследствие того, что закрепляющие их атомы внедрения неподвижны. При температуре выше температуры пика дислокация и закрепляющие ее примеси смещаются по фазе с приложенными напряжениями. В обоих случаях вклад в неупругое затухание будет отсутствовать. Лишь при температуре, отвечающей пику внутреннего трения, примесные атомы отстают от дислокаций, обуславливая неупругость (механическую релаксацию).

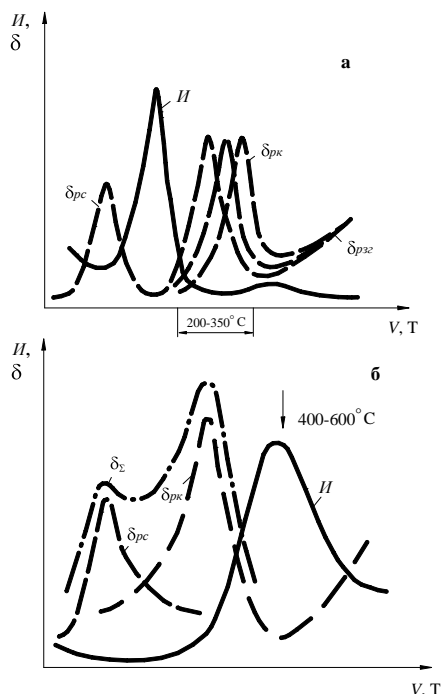


Рис. 5 - Обобщенная взаимосвязь между релаксационными явлениями (δ) и величиной износа (H) стали нормализованной (а) и закаленной (б):

δ_{pc} - релаксация Сноека; δ_{pk} - релаксация Кестера;
 δ_{p32} - зернограничная релаксация; δ_{Σ} - суммарное внутреннее трение

Для нормализованной или высокоотпущенной стали (рис. 5 а) высокая износостойкость при низких скоростях скольжения (до 1 м/с) связана с проявлением пика внутреннего трения - Сноека, при повышенных (2...4 м/с) – Кестера, между ними располагается зона с низкими реологическими свойствами, что и приводит к резкому снижению износостойкости материала.

Закаленная сталь (рис. 5 б) изначально имеет метастабильную структуру, способствующую повышению фона внутреннего трения структурно-дислокационной природы, а также характеризуется более мощным проявлением релаксационных максимумов Сноека и Кестера. Это способствует эффективному неповреждающему рассеиванию подводимой механической энергии, низкому изнашиванию материала при невысоких скоростях и предупреждению развития схватывания I рода. При условиях трения, когда температура поверхности достигает 200...300°C происходят процессы динамического деформационного старения, приводящие к повышению прочностных характеристик металла при сохранении его пластичности. Закаленная сталь при невысоких температурах деформации обладает повышенной склонностью к ДДС [12], что в сочетании с высоким уровнем фона ВТ и действием релаксации Сноека-Кестера обуславливает высокую износостойкость и низкую изнашивающую способность закаленной структуры в диапазоне малых скоростей трения.

При увеличении скорости и соответственно контактной температуры до 400...600° С, быстротекущее динамическое старение резко повышает стабильность стали, вследствие чего возрастает и ее релаксационная стойкость. Такой материал не способен сопротивляться изнашиванию, поэтому включаются повреждающие процессы релаксации напряжений, обусловленные образованием хрупких микротрещин и схватыванием.

Дальнейшее повышение температурно-скоростных параметров трения создает условия для роста диссипативных свойств тонкой структуры металла вследствие развития процессов высокотемпературной зернограничной релаксации (РЗГ) и снижения интенсивности изнашивания.

Таким образом, в зависимости от скорости скольжения, для процесса трения и изнашивания характерны чередующиеся зоны высокой и низкой износостойкости металлических материалов. Эти зоны обусловлены релаксационными свойствами поверхностных слоев пар трения, которые получены вследствие термообработки сталей или приобретены в процессе контактного взаимодействия. Высокие диссипативные свойства материала способствуют снижению интенсивности износа и наоборот. Процессы старения могут влиять как положительно, так и отрицательно на износостойкость материала. В результате динамического деформационного старения (ДДС) происходят процессы, которые способствуют рассеиванию механической энергии вследствие неупругих явлений, вызванных взаимодействием атомов внедрения и дислокаций, генерирующихся при динамическом нагружении, а также повышаются прочностные характеристики материала без потери его пластичности. Это приводит к значительному повышению износостойкости. И, наоборот, потеря материалом релаксационных свойств, их исчерпание вследствие протекания процессов динамического старения (ДС) закаленных сталей (отпуск под напряжением) приводит к повышению интенсивности изнашивания. Релаксационные химические процессы при недостаточности диссипативных свойств тонкой структуры материала будут способствовать повышению износостойкости. При высоком уровне внутреннего трения материала в

определенном температурно-скоростном интервале его износостойкость максимальна, и мало зависит от состава среды.

Следует учитывать, что с повышением частоты динамического нагружения металла релаксационные пики ВТ смещаются в более высокотемпературную область [13]. Например, при увеличении частоты от 1Гц до 1КГц температура локализации пика Сноека смещается от 40° С до 120...140° С, а пика Кестера от 200° С до 350° С. Аналогично температура максимального развития ДДС также растет с увеличением скорости деформации [12]. Поэтому при росте скорости скольжения (частоты динамического взаимодействия микровыступов сопряженных поверхностей) и соответствующем повышении контактной температуры формируется в некоторых пределах непрерывный температурно-скоростной диапазон трения, в котором действует определенный механизм механической релаксации и интенсивно развивается ДДС. В частности, когда температурно-частотная область проявления релаксации Кестера и эффективного развития ДДС практически совпадают, это приводит к формированию характерного температурно-скоростного диапазона ($V = 2...4$ м/с) вторичной минимизации износа стали в нормализованном или высокоотпущенном состоянии. ДДС и релаксация Кестера взаимно связаны. Так развитие ДДС при температурах 200...250° С приводит к возрастанию пика Кестера в несколько раз [4]. Присутствие в ОЦК твердых растворах внедрения легирующих элементов может вызвать развитие релаксационных процессов, родственных механизму Сноека, что проявляется в появлении дополнительных максимумов ВТ [4]. Примечательно, что например, повышение содержания хрома в закаленной легированной стали смещает положение максимума Сноека к более высоким температурам вплоть до его совмещения с пиком Кестера в районе 200...300° С (при содержании хрома порядка 10 %) [4].

О значительном вкладе релаксационных явлений, наряду с ДДС, в формировании износостойкой субструктуры указывают следующие факты:

1. Первичная минимизация износа нормализованной стали при малых скоростях трения, когда эффекты ДДС еще не получают достаточного развития, но проявляется релаксация Сноека.

2. Резкое снижение износостойкости закаленной стали при повышенных скоростях (и температурах) трения в области развития ДС с потерей релаксационной способности, хотя при этом имеет место рост предела упругости при незначительном изменении показателей макроскопической прочности.

3. Если нормализованная сталь содержит карбидо- и нитридообразование легирующие элементы (например Cr, W), твердый раствор обедняется атомами внедрения (C, N), т.к. последние находятся в связанном состоянии в виде карбидов и нитридов. Это приводит к исчезновению релаксационного пика Кестера и, как следствие, к отсутствию эффекта вторичной минимизации износа.

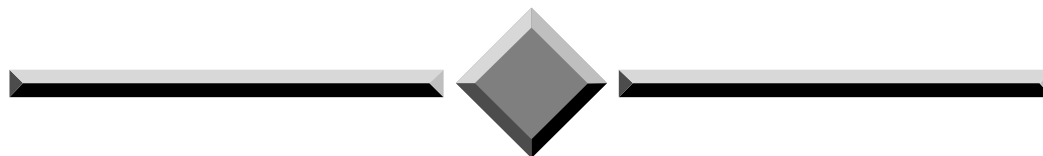
Таким образом, наличие эффектов первичной или вторичной минимизации износа, а значит и характер температурно-скоростной зависимости износа определяются химическим составом сплава, частотными и температурными параметрами контактного взаимодействия при динамическом трении.

Литература

- 1 Шевеля В.В., Назаренко П.В., Гладченко А.Н., Шевеля И.В. Внутреннее трение как фактор износостойкости трибосистемы // Трение и износ. – 1990. - Т. 11. № 6. – С. 979-986.
- 2 Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. - К.: Техника, 1970. – 395с.
- 3 Крагельский И.В. Трение и износ. – М., 1968.
- 4 Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 200с.
- 5 Гордиенко Л.К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов. – М.: Наука, 1973. – 224с.
- 6 Олександренко В.П. Установка и методика для исследования влияния скорости скольжения на процесс трения и износа авиационных материалов // Исследование эксплуатационных свойств авиаГСМ и спецжидкостей. – К.: КИИГА, 1986. – С. 68-71.
- 7 Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения // Трение и износ. 1993, т. 14, № 1. – С. 48-62.
- 8 Глинка Н.Л. Общая химия. – Л.: Химия, 1988. – 704с.
- 9 Шевеля В.В., Джимала А., Калда Г.С., Олександренко В.П., Шевеля И.В. Трибохимия и реология износостойкости металлических и металлополимерных систем // Трибофатика: Пр. 4-го Міжнародного симпозіуму з трибофатики (ISTF 4), 23-27 вересня 2002р., Тернопіль (Україна) / Відп. ред. В.Т. Трошенко – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2002. – Т. 2. – С. 537-541.
- 10 Форрест П. Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352с.

- 11 Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Машиностроение, 1982. – 584с.
- 12 Бабич В.К., Гуль Ю.Я. Долженков Й.Е. Деформационное старение стали. – М.: Металлургия, 1972. – 320с.
- 13 Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1969. – 332с.
- 14 Гаврилюк В.Г. Распределение углерода в стали. – К.: Наукова думка, 1987. – 208с.
- 15 Пастухов Ж.П., Рахштад А.Г., Каплун Ю.А. Динамическое старение сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 320с.
- 16 Шевеля И.В. Влияние реологических свойств металлов и сплавов на износостойкость трибосистем: Дис. канд. техн. наук. – Киев, 1991.
- 17 Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1975. – 470с.

Надійшла 3.06.2003



ЧИТАЙТЕ
журнал
“**Problems of Tribology**”
во всемирной сети
INTERNET !

<http://www.tup.km.ua>

ИЛИ

<http://www.r-style.kiev.ua/tribology/journal.htm>