

Исследование влияния состава смазочной среды на процессы усталости и изнашивания стали 45 при их отдельном и совместном протекании

Г. В. Цыбанев^а, О. Н. Белас^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Секция прикладных проблем Президиума НАН Украины, Киев, Украина

Анализ экспериментальных данных по усталости и износу элементов трибосистемы в смазочных средах различного состава показывает, что путем направленного легирования этих сред можно управлять процессами пассивации поверхностных слоев при трении материалов, от которых зависит сопротивление последних усталости и изнашиванию. Изменяя положение и размер области существования поверхностных структур, можно значительно изменить усталостную долговечность элементов трибосистемы.

Ключевые слова: усталость, сопротивление усталости, усталостная долговечность, износостойкость, износ, изнашивание, трибосистема, смазочная среда, поверхностные структуры.

Введение. Воздействие сред может вызывать обратимое или необратимое изменение свойств материалов. Влияние смазочной среды начинается с адсорбции поверхностью ее активных элементов – это первичное и универсальное свойство сред, а далее может развиваться химическое или электрохимическое взаимодействие между материалом и средой.

В настоящей работе описаны экспериментальные исследования по оценке влияния состава смазочных сред на процессы трения и усталости, протекающие одновременно в материале элементов трибосистемы. Цель исследований заключается в установлении закономерностей взаимного влияния процессов трения и усталости в материале в зависимости от состава смазочной среды с использованием методик, разработанных ранее [1–3].

Методика испытаний и смазочные среды. Чтобы определить влияние состава смазочной среды на характеристики сопротивления усталости материала элементов трибосистемы, были проведены испытания на усталость образцов из нормализованной стали 45 при консольном изгибе с вращением. С этой целью использовались специально созданная экспериментальная установка и образцы к ней [2]. Для сосредоточения места усталостного разрушения, приложения сил контакта и трения через контртело, изготовленное также из стали 45, в образце выполнялась кольцевая выточка (концентратор напряжений). Экспериментально определялся эффективный коэффициент концентрации напряжений, равный 1,25.

Использовались следующие смазочные среды: вазелиновое масло (ВМ), вазелиновое масло с добавкой поверхностно-активного вещества (ВМ + ПАВ); минеральное масло МС-20 (МС); масло МС-20 с добавками химически активных присадок (МС + ХАП), содержащих фосфор (МС + Р), серу (МС + S) и серофосфорный комплекс ДФ-11 (МС + ДФ). В качестве ПАВ использова-

лась олеиновая кислота. Масло при испытаниях подавалось в зону предполагаемого усталостного разрушения с помощью насоса, обеспечивающего постоянный расход, равный 30 мл/с. Также были проведены испытания на усталость в воздушной среде.

В качестве величины, характеризующей влияние среды на усталостную прочность материалов, использовался коэффициент β_c^1 , введенный Г. В. Карпенко [4] и названный им коэффициентом циклической прочности для данной среды. Коэффициент представляет собой отношение предела выносливости σ_{-1}^c материала в данной среде к пределу выносливости σ_{-1} , определенному в воздушной среде:

$$\beta_c^1 = \sigma_{-1}^c / \sigma_{-1}. \quad (1)$$

Предел выносливости определялся на базе 10^6 цикл. Частота циклического нагружения составляла 50 Гц.

Влияние состава смазочных сред на характеристики сопротивления усталости. В ряде работ [5–7] установлено, что образование и развитие усталостных трещин в воздушной среде происходит гораздо быстрее, чем в вакууме. Это обусловлено повторяющимся разрушением оксидных пленок, происходящим преимущественно по межзеренным границам или окисленным карбидам [7]. Основное влияние на распространение трещины среда оказывает на ранних стадиях ее роста, когда существуют микротрещины. По-видимому, происходит это из-за непосредственного доступа среды к вершине трещины, скорости роста которой настолько малы, что успевают произойти взаимодействие между материалом и элементами среды.

Согласно анализу вышеприведенных работ, в данных исследованиях в качестве наименее активной смазочной среды выбрано ВМ. Следовательно, в знаменателе формулы (1) необходимо использовать предел выносливости σ_{-1}^0 , определенный при испытаниях в среде ВМ. Предлагается рассчитывать коэффициент циклической прочности для смазочной среды (β_c):

$$\beta_c = \sigma_{-1}^c / \sigma_{-1}^0. \quad (2)$$

Полученные результаты представлены на рис. 1.

Видно, что при подаче смазки в зону предполагаемого разрушения кривые усталости образцов располагаются выше (на рис. 1 кривые 1–4) таковых образцов без смазки (кривая 5). Масляная пленка служит экраном, препятствующим адсорбции кислорода воздуха на ювенильных поверхностях, что тормозит развитие коррозионных процессов и ослабляет отрицательное влияние кислорода воздуха на процесс усталости. Растворенный в вазелиновом масле кислород (на рис. 1 кривая 1) оказывает коррозионное воздействие [8, 9], но в значительно меньшей степени. При испытании образцов в среде МС (на рис. 1 кривая 2) в результате адсорбции происходит понижение усталостной прочности стали 45, так как среда содержит ПАВ, хотя и в небольшом количестве. Более заметное влияние ПАВ на процессы усталостного разрушения стали 45 оказывает введение в среду ВМ 2 мас.%

олеиновой кислоты (на рис. 1 кривая 4). В табл. 1 приведены ограниченные пределы выносливости, полученные при испытаниях на базе 10^6 цикл, и коэффициенты циклической прочности в соответствии с (2).

Т а б л и ц а 1
Результаты испытаний на усталость стали 45 в различных по составу смазочных средах

Среда	σ_{-1} , МПа	β_c
ВМ	325	1,000
МС-20	315	0,970
МС-20 + ХАП	313	0,963
ВМ + ПАВ	305	0,936
Воздух	278	0,853

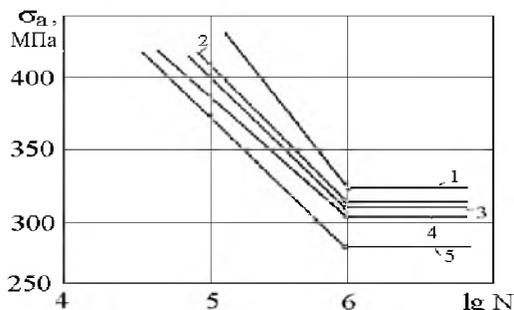


Рис. 1. Кривые усталости образцов из стали 45, испытанных в различных средах: 1 – ВМ; 2 – МС; 3 – МС + ХАП; 4 – ВМ + ПАВ; 5 – воздушная среда.

В основу механизма усталостного разрушения материала, в какой бы среде оно не происходило, положено образование и развитие в ходе циклического нагружения микротрещин усталости. Факторы, способствующие процессу образования микротрещин усталости и облегчающие их дальнейшее развитие, будут приводить к снижению усталостной прочности материалов, и наоборот, факторы, затрудняющие их образование и замедляющие развитие, – к ее росту. Весь процесс образования и развития усталостной трещины можно разделить, как минимум, на три этапа, каждый из которых имеет самостоятельное значение. Первый этап – образование пластических сдвигов и возникающее в результате этого упрочнение. Второй этап – “разрыхление” решетки после предельного упрочнения и возникновение микротрещин. Третий этап – образование магистральной трещины усталости и дальнейший ее рост. Эта схема в основном остается такой же и при наличии ПАВ, но процесс усталостного разрушения происходит гораздо интенсивнее прежде всего за счет значительного сокращения длительности первого этапа. В результате адсорбции активных элементов среды на поверхности циклически нагружаемого металла при заданной амплитуде напряжений облегчается образование пластических сдвигов и резко возрастает их число. Тем самым способность материала к упрочнению исчерпывается при меньшем числе циклов,

и раньше наступает второй этап усталостного разрушения – разупрочнение (разрыхление решетки) материала после предельного упрочнения. При образовании микротрещин усталости в них под действием капиллярных сил проникает рабочая среда. Адсорбция ПАВ на стенках трещин в процессе их развития приводит к снижению поверхностной энергии, т.е. работы, расходуемой на образование новых поверхностей, облегчая тем самым дальнейшее развитие усталостной трещины. Таким образом, действует эффект Ребиндера во всех его проявлениях [4–6, 10–12].

Незначительное воздействие на усталость стали 45 оказывают ХАП в МС (на рис. 1 кривая 3), т.е. их действие соответствует влиянию самого МС (кривая 2). Наиболее низкая усталостная долговечность стали получена при испытаниях в воздушной среде (на рис. 1 кривая 5). Это, как отмечалось выше, по-видимому, обусловлено коррозионным действием находящегося в воздухе кислорода, атомы которого могут беспрепятственно хемосорбироваться на ювенильных поверхностях материала. При этом часть атомов кислорода в результате диффузионных процессов, интенсивно протекающих в условиях циклического нагружения [4, 11, 12], транспортируется в глубь металла по активным полосам скольжения, создавая препятствия движению дислокаций и способствуя их скоплению до критической плотности, что приводит к более быстрому усталостному разрушению [5, 9].

На рис. 2 приведены диаграммы прогиба образцов H при испытании на усталость в ВМ и воздушной среде на уровне амплитуды напряжений $\sigma_a = 400$ МПа. При этом значения усталостных характеристик, полученные в ВМ, наибольшие, в воздушной среде – наименьшие. На диаграммах (рис. 2) светлыми точками обозначены максимальные H_{\max} (верхние точки на кривых 1 и 2) и критические $H_{\text{кр}}$ (нижние точки на кривых 1 и 2) значения прогиба, которые соответствуют моменту зарождения трещины и началу ее ускоренного неконтролируемого роста перед окончательным разрушением [13].

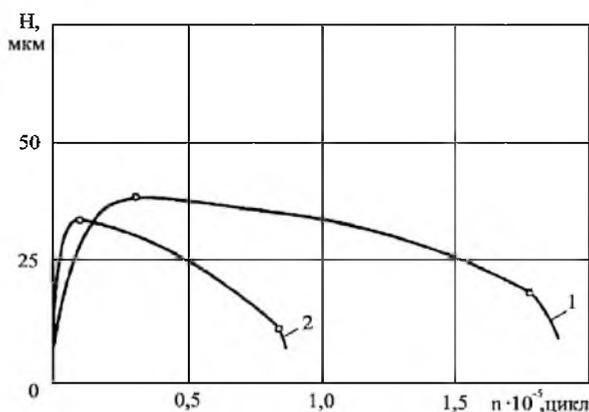


Рис. 2. Диаграммы прогиба образцов из стали 45 при испытании на усталость в ВМ (1) и воздушной среде (2).

Представленные результаты отражают тенденцию, следующую из литературных источников: наличие смазки приводит к увеличению длительности стадий зарождения трещины (от начала нагружения до точки H_{\max}) и ее

роста (от точки H_{\max} до точки $H_{\text{кр}}$). При этом величина прогиба несколько выше для образцов, испытанных в смазочной среде, чем в воздушной. Аналогичные результаты получены также для других сред, испытания в которых позволили построить кривые усталости, расположенные между кривыми 1 и 5 на рис. 1. Величины прогиба образцов и длительность стадий зарождения T_1 и роста T_2 трещины при испытаниях в различных средах представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Величины прогиба и длительность стадий усталости стали 45 в различных по составу смазочных средах при $\sigma_a = 400$ МПа

Среда	H_{\max} , мкм	$H_{\text{кр}}$, мкм	T_1 , с	T_2 , с
ВМ	33	20	170	3000
МС-20	35	22	160	2140
МС + ХАП	38	20	140	2160
ВМ + ПАВ	40	20	130	2500
Воздух	30	15	120	960

Приведенные данные подтверждают, что величина максимального прогиба во всех смазочных средах больше, чем в воздушной среде. Это свидетельствует о более высокой циклической пластичности поверхностного слоя стали 45 в этих условиях. Наличие ХАП и ПАВ в смазочных средах (в какой-то мере они присутствуют и в МС) по сравнению с таковыми в ВМ приводит также к интенсификации процесса пластического деформирования, что выражается в увеличении прогиба образца. Из результатов табл. 2 также следует, что смазочные среды по сравнению с воздушной средой способствуют повышению длительности как стадии зарождения трещины, так и ее роста.

Влияние состава смазочных сред на характеристики износостойкости. Рассматривая закономерности изменения триботехнических характеристик и параметров акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от состава смазочной среды, была установлена различная эффективность добавок в масла, определяющая условия работы узла трения. В результате проведенных исследований разработан способ контроля служебных свойств смазывающих масел [14], позволяющий сократить длительность испытаний и упростить контроль их противоизносных свойств.

В качестве параметра, характеризующего влияние состава смазочной среды на трибопроцессы и позволяющего ранжировать смазывающие масла по служебным свойствам, предложен коэффициент

$$\alpha_c = H_{\text{аэ}}/P_{\text{к.кр}}, \quad (3)$$

где $H_{\text{аэ}}$ – значение акустико-эмиссионной информационной энтропии, полученное при расчете по методике [15]; $P_{\text{к.кр}}$ – значение критического удельного давления в контакте трибосопряжения в данной смазочной среде, установленное при определении $H_{\text{аэ}}$.

Полученные результаты представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Как отмечалось ранее [15], акустико-эмиссионная информационная энтропия тесно коррелирует с интенсивностью изнашивания (коэффициент корреляции $\sim 0,9$), что подтверждает зависимость параметров АЭ от процессов деформирования и разрушения в зоне фрикционного контакта. Чем интенсивнее протекают процессы поверхностного разрушения материалов трибосистемы, тем выше будут значения $H_{аэ}$, а следовательно, быстрее пара трения выйдет из строя: повреждаемость, недопустимый износ [6]. Зависимости, представленные на рис. 3, наглядно иллюстрирует влияние состава смазочной среды на закономерности изменения $H_{аэ}$. Изменение состава смазочной среды позволяет уменьшать уровень значений $H_{аэ}$ (на рис. 3 кривые 3–5 по сравнению с кривой 2), повышать его (кривая 6 по сравнению с кривой 1), а также расширять диапазон низких значений $H_{аэ}$ (кривые 3–5).

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициента α_c по результатам испытания пар трения в различных по составу смазочных средах

Среда	$H_{аэ}$, бит	$P_{кр}$, МПа	$\alpha_c \cdot 10^2$, бит/МПа
МС + ДФ	4,05	405	1,0000
МС + S	4,10	405	1,0124
МС + P	3,95	387	1,0207
МС-20	3,95	358	1,1034
ВМ + ПАВ	4,00	313	1,2780
ВМ	4,15	241	1,7220

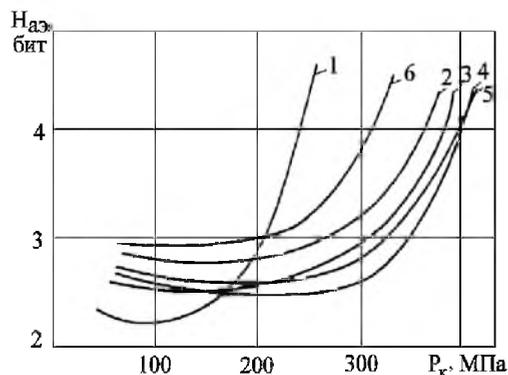


Рис. 3. Изменение акустико-эмиссионной информационной энтропии в зависимости от контактной нагрузки на пару трения сталь 45–сталь 45 при граничной смазке: 1 – ВМ; 2 – МС; 3 – МС+P; 4 – МС + S; 5 – МС + ДФ; 6 – ВМ + ПАВ.

Особенностью результатов испытаний пар трения (табл. 3) является то, что показания триботехнических характеристик параметров АЭ определяются по достижении критического значения, которое для базового МС соответствует моменту возникновения начальной повреждаемости на поверхностях трения образца из стали 45.

Для этого случая регистрируется амплитудное распределение сигналов АЭ и, переходя к распределению плотности вероятности амплитуд сигналов АЭ, рассчитывается значение $H_{аэ}$. В момент возникновения повреждаемости в поверхностных слоях элементов пары трения фиксируется значение удельного давления в контакте, которое является критическим для данных условий эксперимента. После этого рассчитывается коэффициент α_c для МС. Аналогично проводятся испытания пар трения в других смазочных средах: снимаются показания значений $H_{аэ}$ и $P_{к.кр}$ при возникновении повреждаемости на поверхностях трения и рассчитывается коэффициент α_c . Размерность коэффициента α_c выражается в бит/МПа, что указывает на недостаток количества информации об исследуемой системе, отнесенного к единице контактного давления в момент перехода трибосистемы от нормального трения к повреждаемости. Чем меньше значение $H_{аэ}$, тем меньше неопределенность системы. Следовательно, можно с большей достоверностью предсказать состояние трибосистемы. Как было установлено выше, значения $H_{аэ} = (2...3)$ бит соответствуют режиму нормального трения. При возникновении повреждаемости поверхностей трения исследуемая трибосистема может с равной вероятностью принимать любое состояние из числа заданных, поэтому значение $H_{аэ}$ увеличивается. Поскольку для проведения всех испытаний образцы исследуемой пары трения изготовлялись из нормализованной стали 45, при возникновении повреждаемости поверхностей трения значения $H_{аэ}$ должны приближаться к вполне определенной величине, характерной для этого материала, что и подтверждается результатами исследований (табл. 3). По-видимому, значение $H_{аэ} \approx 4$ бит является для данной пары трения и условий эксперимента той характерной величиной, которая указывает на возникновение повреждаемости поверхностей трения.

Анализ микрофотографий поверхностей трения, соответствующих режиму нормального трения и повреждаемости и полученных при испытаниях в различных смазочных средах, показывает приблизительно равную степень поврежденности поверхностей трения, что свидетельствует об идентичности условий работы элементов трибосопряжений. Главная причина роста химической реакционной способности материала состоит в увеличении энтальпии твердого тела за счет изменения его реальной структуры под действием силового поля [6, 16]. Однако такие среды, как ВМ и МС, не содержат в достаточном количестве активных элементов, способных приводить поверхностные слои материала в равновесное устойчивое состояние. Поэтому при сложных режимах трения быстрее возникает повреждаемость (на рис. 3 кривые 1 и 2). Анализ химического состава поверхностей трения после испытаний в указанных смазочных средах свидетельствует о наличии кислорода, что вполне логично, так как наиболее активным и, пожалуй, единственным элементом в минеральных маслах является кислород [8, 17]. Одно из эффективных средств управления процессами трения и изнашивания материалов – добавка в масло специальных ПАВ и ХАП [6]. При смазывании поверхностей трения минеральными маслами в качестве активных веществ обычно используются органические соединения, содержащие серу, фосфор, азот и др. В результате взаимодействия добавок с активированными поверхностными слоями металла образуются поверхностные структуры, обладающие

более высокой износостойкостью и лучшими противозадирными свойствами, чем поверхностные структуры, содержащие кислород (на рис. 3 кривые 3–5). При явлении структурной приспособляемости процессы активации и пассивации поверхностных слоев находятся в динамическом равновесии [6]. Каждому уровню активации трущегося материала соответствует строго определенная степень пассивации поверхностей трения за счет взаимодействия с активными элементами среды. При относительно низких значениях удельной работы трения образуются поверхностные структуры, малонасыщенные активными элементами. Поэтому удовлетворительные результаты можно получить даже при использовании чистых минеральных масел, содержание растворенного кислорода в которых обеспечивает протекание нормального трения. При увеличении значений удельной работы трения уровень активации поверхностей возрастает, а пассивирующая способность среды не удовлетворяет потребности – возникает повреждаемость. Добавка в смазочное масло присадок способствует расширению диапазона нормального трения за счет повышения пассивирующей способности смазочной среды (табл. 3).

Влияния состава смазочных сред на характеристики износостойкости при действии циклического нагружения. После определения влияния смазочной среды на протекание трибопроцессов и расчета коэффициента циклической прочности β_c представляет интерес исследование изменения интенсивности изнашивания стали 45 в зависимости от условий циклического нагружения одного из элементов трибосистемы в различных смазочных средах. Ранее установлено [1], что циклическое нагружение влияет на процессы трения и изнашивания: износ элемента трибосистемы увеличивается и во многом зависит от величины и длительности приложения циклической нагрузки.

Были проведены исследования при граничном трении образцов из нормализованной стали 45 в среде МС + Р, которая содержит химически активный фосфор, с циклическим нагружением одного из элементов трибосистемы. Показано, что на сталях фосфорные присадки образуют фосфаты железа [8, 17], пленки которых обладают антизадирным действием и, как следствие, существенно уменьшают износ. При действии на образец циклической нагрузки также установлено значительное повышение интенсивности изнашивания $I^{\text{ц}}$ по сравнению с таковой при испытаниях без циклической нагрузки I (рис. 4).

В результате влияния циклического нагружения на трибопроцессы при использовании среды МС + Р установлено уменьшение диапазона нормального трения приблизительно в 1,5 раза, что соответствует данным, полученным при испытаниях в среде МС. Использование последней при испытаниях пар трения в условиях циклического нагружения по сравнению с испытаниями без циклического нагружения позволяет увеличить интенсивность изнашивания стали 45 на 10...20%. При использовании среды МС + Р степень влияния циклического нагружения на износостойкость соответствует 15...33%.

Испытания на износ образцов из стали 45 в среде МС + Р показывают, что уровень значений интенсивности изнашивания уменьшается до 30% по сравнению с испытаниями в среде МС. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Результаты испытания пар трения в условиях граничной смазки маслами МС-20 и МС + Р при циклическом нагружении

P_k , МПа	σ_a , МПа	$H_{аз}$, бит	$P_{к.кр}$, МПа	I , мкм/км	$\alpha_c \cdot 10^2$, бит/МПа
150	0	3,95	358	0,1400	1,1034
150	0	3,95	387	0,1050	1,0207
150	350	4,05	220	0,1700	1,8409
150	350	4,05	250	0,1400	1,6200
150	400	4,00	250	0,1630	1,6000
150	400	4,03	270	0,1300	1,4926
150	450	3,98	280	0,1054	1,4244
150	450	4,02	300	0,1200	1,3400

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные при использовании среды МС-20, под чертой – МС + Р.

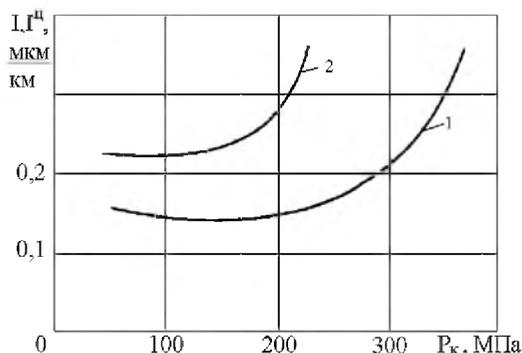


Рис. 4. Изменение интенсивности изнашивания стали 45 при граничном трении в среде МС + Р: 1 – $\sigma_a = 0$; 2 – $\sigma_a = 350$ МПа.

На следующем этапе исследований в качестве добавки в МС выбрана свободная сера (0,25 мас.%), которая позволяет значительно расширить диапазон нормального трения. Циклическое нагружение и в этом случае оказывает влияние на трибопроцессы. Результаты испытаний пар трения в среде МС + S представлены в табл. 5.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в среде МС + S диапазон нормального трения при циклическом нагружении уменьшается примерно в 1,5 раза, а снижение износостойкости стали 45 составляет 1,07...1,3 раза, т.е. 7...30%.

Результаты испытаний с использованием присадки комбинированного типа ДФ-11, которая содержит несколько активных элементов одновременно, приведены в табл. 6. Комбинированная добавка ДФ в МС способствует улучшению как противоизносных, так и антизадирных характеристик трибо-системы. Отрицательное влияние циклического нагружения способствовало уменьшению диапазона нормального трения приблизительно в 1,5 раза и повышению интенсивности изнашивания стали 45 на 3...28%.

Т а б л и ц а 5

**Результаты испытания пар трения в условиях граничной смазки МС + S
при циклическом нагружении**

$P_{к,}$ МПа	$\sigma_{д,}$ МПа	$H_{аз,}$ бит	$P_{к,кр,}$ МПа	$I,$ мкм/км	$\alpha_c \cdot 10^2,$ бит/МПа
150	0	4,10	405	0,120	1,0124
150	350	4,13	270	0,157	1,5296
150	400	4,12	300	0,145	1,3733
150	450	4,08	330	0,128	1,2364

Т а б л и ц а 6

**Результаты испытания пар трения в условиях граничной смазки МС + ДФ
при циклическом нагружении**

$P_{к,}$ МПа	$\sigma_{д,}$ МПа	$H_{аз,}$ бит	$P_{к,кр,}$ МПа	$I,$ мкм/км	$\alpha_c \cdot 10^2,$ бит/МПа
150	0	4,05	405	0,115	1,0000
150	350	4,10	280	0,147	1,4643
150	400	4,08	310	0,135	1,3161
150	450	4,06	340	0,118	1,1941

Таким образом, влияние циклического нагружения на трибопроцессы при испытаниях пар трения в различных смазочных средах приводит к относительному уменьшению диапазона нормального трения примерно в 1,5 раза и повышению интенсивности изнашивания стали 45 на 3...33% по сравнению с испытаниями без циклического нагружения одного из элементов трибосистемы. В то же время анализ значений коэффициента α_c (табл. 4–6) свидетельствует о влиянии состава смазочной среды на триботехнические характеристики стали 45 при циклическом нагружении одного из элементов трибосистемы.

Добавка ДФ в МС способствует формированию на поверхности трения наиболее эффективных пленок поверхностных структур, служебные свойства которых повышаются на 16...20%. Результаты контроля служебных свойств поверхностных структур, образующихся на поверхности стали 45 при испытании пар трения в условиях циклического нагружения, приведены в табл. 7. Установлено, что на трибопроцессы оказывают значительное влияние как циклическое нагружение, так и состав смазочной среды.

Представления о структурной приспособляемости материалов при трении свидетельствуют о первостепенной роли смазочной среды в расширении диапазона и оптимизации параметров этого явления. Одним из наиболее эффективных методов практического использования рабочей среды для управления надежностью является применение смазочных материалов. Минимизация износа и обеспечение его необходимого диапазона для данной трибосистемы при изменении внешних механических воздействий достигаются при энергетическом равновесии процессов активации и пассивации. В резуль-

тате нарушения этого равновесия происходит либо нежелательное повышение износа трибосистемы при некотором росте диапазона нормального трения, либо сужение этого диапазона и проявление недопустимых процессов повреждаемости поверхностей трения.

Т а б л и ц а 7

Изменение свойств пленок поверхностных структур ($\alpha_c \cdot 10^2$), образующихся при испытании пар трения в различных по составу смазочных средах, при циклическом нагружении

Масло	σ_a , МПа, равное				$\bar{\alpha}_c$
	0	350	400	450	
МС-20	1,1034	1,8409	1,6000	1,4244	–
МС+Р	1,0207	1,6200	1,4930	1,3400	5,3...11,9
МС+S	1,0124	1,5296	1,3733	1,2364	12,6...16,3
МС+ДФ	1,0000	1,4643	1,3161	1,1941	16,8...20,7

Примечание. Величина $\bar{\alpha}_c$ рассчитывается как отношение (в %) коэффициента α_c , определенного для масла МС-20, к такому же коэффициенту для этого масла с добавками при одинаковых амплитудах напряжения.

Среда, ее состав и концентрация компонентов в ПАВ и ХАП – наиболее важные и доступные для практики факторы, позволяющие достичь необходимого равновесия с минимальным уровнем износа и достаточным для конкретных условий нагружения диапазоном нормального трения.

Наиболее типичным видом поверхностных структур трансформированного металла является насыщение его кислородом. Однако поскольку эффективным средством управления процессом пассивации служит добавка в масло специальных ХАП, в результате взаимодействия присадок с активированным металлом образуются поверхностные структуры неокислородного происхождения. В зависимости от назначения присадки могут расширять диапазон нормального трения (противозадирные), минимизировать поверхностное разрушение (противоизносные) либо воздействовать комплексно (многофункциональные). Результаты испытаний по оценке влияния смазочной среды на протекание процессов трения, изнашивания и усталости приведены выше. Ниже будет рассмотрено влияние трения на процессы усталости стали 45 с учетом состава смазочной среды.

Степень влияния трения на процессы усталости с учетом состава смазочной среды. Ранее [1] показано, что условия трения существенно влияют на сопротивление усталости элементов трибосистемы. Проведение дальнейших исследований позволяет установить, какая из присадок наиболее эффективна с точки зрения положительного влияния величины контактной нагрузки на сопротивление усталости. На рис. 5 представлены полученные кривые $N - P_k$ для таких сред, как МС + Р и МС + S, в которых в МС добавлены наиболее распространенные химически активные компоненты, улучшающие характеристики элементов трибосистемы.

Противоизносная эффективность поверхностных структур, образуемых на стальных образцах присадками с активным фосфором, изучена достаточно

хорошо [8, 17, 18]. Данные многих исследований позволяют считать установленными следующие свойства пленок, формируемых фосфорными соединениями на поверхностях трения: они могут образовываться при более низких температурах, чем пленки сульфидов и хлоридов. Фосфор энергично хемосорбируется на стали уже при комнатной температуре, следовательно, и на смазываемых, но не трущихся поверхностях. Видимо, поэтому значения максимальной усталостной долговечности для среды МС + Р ниже, чем для МС. Благодаря такой “активности” фосфора поверхности трущихся образцов быстрее насыщаются этим элементом, вследствие чего сужается диапазон существования поверхностных структур.

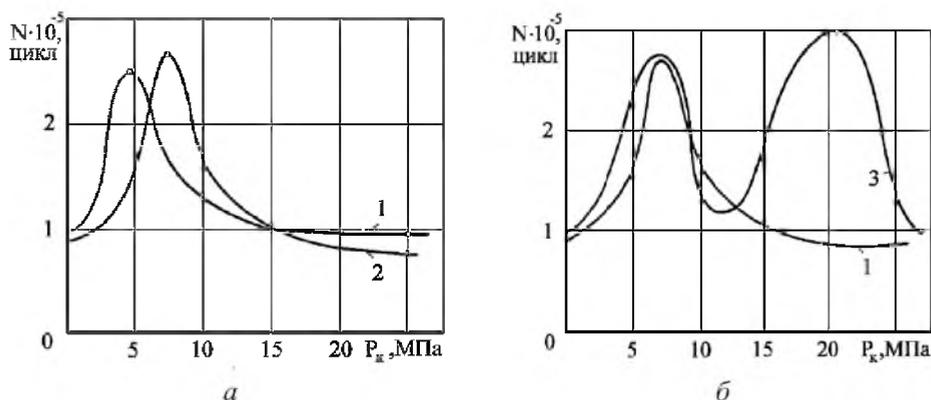


Рис. 5. Изменение усталостной долговечности образцов из стали 45 в зависимости от контактной нагрузки при циклическом нагружении ($\sigma_a = 400$ МПа) в смазочной среде: 1 – МС; 2 – МС + Р; 3 – МС + S.

При использовании свободной серы в качестве добавки в МС установлены два участка, где наблюдается повышение усталостной долговечности. Положение первого из них позволяет говорить о практическом его совпадении с участком, полученным при испытаниях в среде МС. По всей вероятности, при данных условиях нагружения еще не происходит взаимодействия серы с поверхностью материала образцов, поскольку, как отмечается в ряде работ, антизадирный эффект серных присадок может проявляться только при высоких температурах на поверхности трущихся материалов. Это подтверждается анализом химического состава поверхностей трения, согласно которому относительная концентрация серы на трущихся поверхностях практически не изменяется по глубине травления, в то время как интенсивность пика кислорода идентична интенсивности пика кислорода, определенной для МС. Поскольку добавки серы наиболее эффективны в условиях повышенных температур, становится очевидным появление второго участка, где также имеет место увеличение усталостной долговечности.

По-видимому, при контактной нагрузке $P_k = 15...21$ МПа начинается активное взаимодействие серы со сталью 45, в результате чего активируемые трущиеся поверхности насыщаются еще одним пассиватором – серой. Это приводит к изменению химического состава пленок поверхностных структур. Дальнейшее повышение контактной нагрузки, а значит, и уровня активирования материала для поддержания энергетического равновесия требует до-

полнительного насыщения трущихся поверхностей активными компонентами среды. Все это приводит к образованию поверхностных структур, обладающих большей поверхностной прочностью, однако менее пластичных. При механических воздействиях на поверхности материала возникает сетка микротрещин, которые являются концентраторами напряжений, а при действии циклических нагрузок способствуют зарождению трещин усталости, чем можно объяснить в дальнейшем резкое снижение усталостной долговечности.

Для проверки данных предположений было проведено серию испытаний с использованием комплексной многофункциональной присадки ДФ, содержащей оба указанных компонента – серу и фосфор. Результаты проведенных исследований полностью подтвердили предположения. На рис. 6 представлена кривая $N - P_k$, которую легко можно сравнить с приведенными на рис. 5. Диапазон значений усталостной долговечности для среды МС + ДФ полностью перекрывает все полученные выше диапазоны. Данные анализа химического состава пленок поверхностных структур также подтверждают вышеизложенные предположения.

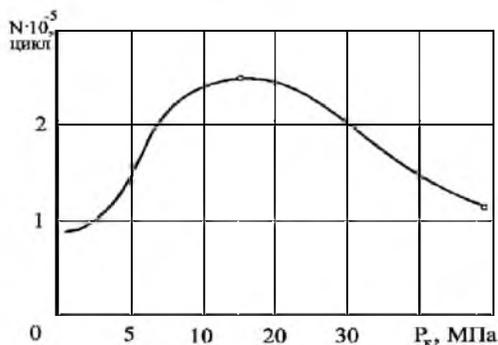


Рис. 6. Изменение усталостной долговечности образцов из стали 45 в зависимости от контактной нагрузки при циклическом нагружении ($\sigma_a = 400$ МПа) в среде МС + ДФ.

Заключение. Из приведенных результатов следует, что путем направленного легирования смазочных сред можно управлять процессами пассивации поверхностных слоев при трении и изнашивании материалов, от которых зависит их сопротивление усталости. Изменяя положение и размер области существования поверхностных структур, можно корректировать уровень усталостной долговечности элементов трибосистемы, значительно увеличивая ее. Это позволяет с большей уверенностью говорить о возможности повышения надежности узлов трения машин, работающих в условиях циклического нагружения.

Резюме

Аналіз експериментальних даних, отриманих при випробуваннях на втому та знос елементів трибосистеми у мастильних середовищах різного складу, показує, що шляхом направленої легування цих середовищ можна керувати процесами пасивації поверхневих шарів при терті матеріалів, від яких залежить опір останніх утомі та зношуванню. Зміна положення і розміру області існування поверхневих структур дозволить змінювати втому довшовічність елементів трибосистеми.

1. *Цыбанев Г. В., Белас О. Н.* Методика испытаний на усталость материала элементов трибосистемы // Пробл. прочности. – 1991. – № 8. – С. 72 – 77.
2. *А. с. № 1668914 СССР.* Способ износоусталостных испытаний материалов и установка для его реализации / И. Г. Носовский, О. Н. Белас, Г. В. Цыбанев. – Оpubл. 07.08.1991. Бюл. № 29.
3. *А. с. № 1573392 СССР.* Способ испытания материалов на усталость при изгибе / И. Г. Носовский, О. Н. Белас, Г. В. Цыбанев и др. – Оpubл. 23.06.90. Бюл. № 23.
4. *Карпенко Г. В.* Влияние активных жидких сред на выносливость стали. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955. – 207 с.
5. *Уэдсворт Н. Дж.* Влияние окружающей среды на усталость металлов // Усталость и выносливость металлов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 101 – 113.
6. *Костецкий Б. И., Носовский Л. И., Бершадский Л. И. и др.* Надежность и долговечность машин. – Киев: Техніка, 1975. – 408 с.
7. *Усталость* материалов при высокой температуре / Под ред. Р. П. Скелтона. – М.: Металлургия, 1988. – 343 с.
8. *Виноградов Г. В., Подольский Ю. Д.* Механизм противоизносного и антифрикционного действия смазочных сред при тяжелых режимах граничного трения // О природе трения твердых тел. – Минск: Наука и техника, 1971. – С. 281 – 304.
9. *Fujita F. E.* Fracture Solids. – New York; London, 1963. – 657 p.
10. *Ребиндер П. А.* Физико-химическая механика. – М.: Сов. наука, 1958. – 64 с.
11. *Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А.* Физико-химическая механика металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 304 с.
12. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
13. *Лебедев Т. А., Маринец Т. К., Ефремов А. И.* Исследование циклической прочности металлов методом записи диаграмм усталости // Циклическая прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 141– 146.
14. *А. с. 1497495 СССР.* Способ контроля служебных свойств смазывающих масел / И. Г. Носовский, О. Н. Белас, В. Ф. Тесля и др. – Оpubл. 30.07.89. Бюл. № 28.
15. *Белас О. М.* Підхід до оцінки зношування пар тертя методом акустичної емісії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 1. – С. 89 – 90.
16. *Хайнике Г.* Трибохимия. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
17. *Розенберг Ю. А.* Влияние смазочных масел на долговечность и надежность машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
18. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

Поступила 09. 11. 2007