

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 39-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 39-48.

Научная статья

УДК 669.35.5:621.793

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Влияние физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде

Лидия Ивановна Куксенова, д.т.н.

Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9207-6587>

Аннотация. На основе представлений физико-химической механики контактного взаимодействия проведен материаловедческий анализ влияния физико-химических факторов на структуру и износостойкость антифрикционного сплава при трении в поверхностно-активных смазочных средах. Испытания пары трения бронза БрА5 и сталь 45 проводили на машине реверсивного трения скольжения в условиях, соответствующих режимам работы тяжело нагруженных узлов трения. Роль физико-химических факторов, связанных с поверхностной активностью среды, выявляли с использованием экспериментально полученной совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей трения и износа) и микроскопических (микроструктурных) критериев (физического уширения рентгеновских линий, периода кристаллической решетки, элементного состава поверхностного слоя материала зоны контактной деформации), определяемых с применением рентгеноструктурного метода исследования. Показано, что в основе формирования износостойкого структурного состояния материала в поверхностно-активной смазочной среде лежат два структурообразующих процесса: первый процесс – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов легирующих элементов и их переход в смазочную среду, что приводит к созданию поверхностного пластифицированного слоя, и второй процесс – понижение плотности дислокаций в материале зоны деформации, что указывает на эффект пластификации материала (снижение предела его текучести). В результате этих процессов материал зоны контакта существенно отличается от исходного по характеристикам напряженного состояния, микроструктуры и механических свойств. Применение в трибосопряжениях смазочных материалов, содержащих поверхностно-активные вещества, способствует образованию износостойкой структуры в антифрикционном материале.

Ключевые слова: трение, износ, металлы, смазочные материалы, поверхностно-активные вещества, фазовые превращения, контактная деформация, структура

Благодарности: Автор выражает искреннюю благодарность к.ф.-м.н. В.И. Савенко за участие в постановке работы и обсуждение экспериментальных результатов.

Для цитирования: Куксенова Л.И. Влияние физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Physical-chemical factors effect on the structure and properties of metals under conditions of contact deformation during friction in a surface-active lubricating medium

Lidiya I. Kuksenova, D. Eng.

Blagonravov Institute of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. Based on the concepts of the physical-chemical mechanics of contact interaction, a materials science analysis of these factors effect on the structure and wear resistance of an antifriction alloy under friction in surface-active lubricating media has been carried out. Tests of the bronze BrA5 – steel 45 friction pair were carried out on a reversible sliding friction machine under conditions corresponding to the operating modes of heavily loaded friction units. The role of physical-chemical factors related to the surface activity of the medium was revealed using an experimentally obtained set of macroscopic integral criteria (phenomenal indicators of friction and wear) and microscopic (microstructural) criteria (physical broadening of X-ray lines, the period of the crystal lattice, the elemental composition of the surface layer of the material of the contact deformation zone), determined using the X-ray diffraction method. It is shown that the formation of a wear-resistant structural state of a material in a surface-active lubricating medium is based on two structure-forming processes. The first one is connected with the formation of a stationary macroscopic diffusion flow of atoms of alloying elements and their transition into a lubricating medium, which leads to the creation of a surface plasticized layer, and the second process is a decrease in the density of dislocations in the material of the deformation zone, which indicates the effect of plasticizing the material (reducing its yield point stress). As a result of these processes, the material of the contact zone differs significantly from the initial one in terms of stress state, microstructure, and mechanical properties. The use of lubricants containing surfactants in tribounits contributes to the formation of a wear-resistant structure in the antifriction material.

Keywords: friction, wear, metals, lubricants, surfactants, phase transformations, contact deformation, structure

Acknowledgments: The author expresses his sincere gratitude to PhD V.I. Savenko for participation in the work and discussion of the experimental results.

For citation: Kuksenova L.I. Physical-chemical factors effect on the structure and properties of metals under conditions of contact deformation during friction in a surface-active lubricating medium / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-39-48

Введение

Однако все явления, происходящие при внешнем трении, связаны с взаимодействием контактирующих тел как между собой, так и со смазочным материалом, что обеспечивает создание не только граничных смазочных слоев, которые являются продуктами реакции металла с активными компонентами смазочной среды, но и формируется модифицированный поверхностный слой конструкционных материалов в результате упругопластической деформации при трении. При этом механизм трения при граничной смазке представляет собой многостадийный механо-физико-химический процесс, включающий этапы адсорбции, модифицирования и разрушения трущихся поверхностей, а его конечным продуктом является формирование частиц износа.

Эксперименты свидетельствуют, что характерным показателем установившегося режима трения является реализация

периодических кинетических циклов накопления повреждений в зоне локализации деформации металла и разрушения, сопровождающихся динамическим равновесием между разрушением поверхностных структур и их восстановлением. Период этих циклов и их амплитуда являются кинетическими характеристиками накопления повреждаемости и разрушения тонкого поверхностного слоя и в макроскопическом масштабе определяют среднее значение интенсивности изнашивания материалов трибосопряжений для фиксированного пути трения. Согласно кинетической термофлуктуационной теории прочности [1], величина износа I оценивается соотношением $I = (\sum \Delta A_n h) / K [t_0 \exp((U_0 - \gamma \psi \sigma) / RT)]$, где $\sum \Delta A_n h$ – площадь фактического контакта; h – глубина зоны деформации; коэффициент K отражает исходную повреждаемость материала, характеристики релаксации повреждений, число одновременно разрушаемых связей; ψ – коэффициент энергетического поглощения в контакте (его

диссипативность), U_0 – энергия активации разрушения единичной связи; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – действующее напряжение; T – температура. Эффективная энергия активации разрушения определяется как $U_\sigma = U_0 \pm \Delta G - \gamma\sigma$, где ΔG – изменение энергии активации процесса в результате физико-химического воздействия смазочной среды, т.е. параметр, влияющий на кинетику разрушения, связанный со свойствами смазочной среды при трении [2]. Таким образом, при усталостном механизме изнашивания на работоспособность пары трения влияют активационные структурно-чувствительные параметры разрушения: энергия активации U_0 и коэффициент γ , имеющий смысл активационного объема. В условиях контактной деформации значения этих характеристик изменяются под влиянием поверхностно-активной смазочной среды.

В данной работе на примере пары трения медный сплав-сталь излагаются результаты экспериментальных исследований физико-химического влияния смеси дисперсионной среды и дисперсной фазы, входящих в состав пластичного смазочного материала, на реализацию структурно-фазовых превращений в поверхностно-модифицированных слоях антифрикционного сплава и интенсивность его поверхностного разрушения с целью выявления роли физико-химических факторов в формировании износостойкой структуры.

Материалы и методы исследования

Триботехнические испытания пары реверсивного трения скольжения медный сплав – сталь (алюминиевая бронза БрА5 – Ст45)

проводили на машине трения МТ-8 при номинальном контактном давлении 20 МПа и средней скорости относительного скольжения 0,1 м/с. Реверсивное трение, относящееся к тяжелым условиям испытаний с точки зрения деформации поверхностных слоев, позволяет более четко выявлять роль физико-химических факторов активного смазочного материала.

Смазочным материалом служили базовые дисперсионные синтетические среды и загуститель к ним, используемые для работы в трибосопряжениях в широком диапазоне температур и давлений. В качестве базовых сред испытывались синтетическое масло М9С, эфир бензилянтарной кислоты и широкой фракции спиртов С7-С12 ДЭБЯК, смесь дисперсионных сред М9С + ДЭБЯК (1:1). В качестве загустителя дисперсионных сред использовали 12-оксистеарат лития, литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты ($\text{LiC}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_3 = 12\text{-LioSt}$), которое вводилось в дисперсионную среду в количестве 12 %.

Роль среды выявляли с использованием критериальных подходов [3], основанных на экспериментально полученной совокупности макроскопических интегральных критериев (феноменологических показателей потерь на износ, I_h) и микроскопических (микроструктурных) критериев (физического уширения рентгеновских линий материала зоны контактной деформации $\beta_{(hkl)}$ и периода кристаллической решетки материала поверхностного слоя), определенных с помощью физических методов исследования [6].

Результаты и их обсуждение

Фрагменты дифрактограмм при рентгеноструктурных исследованиях деформированной при трении бронзы БрА5 приведены на рис. 1.

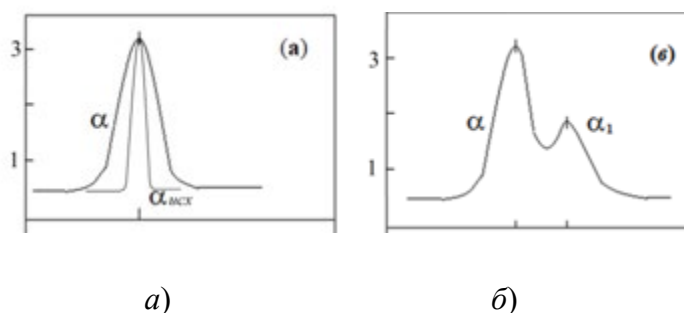


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм бронзы БрА5 после трения в средах:
а – М9С; б – ДЭБЯК

Fig. 1. Fragments of brass Br5 diffractograms after friction in media:
a – M9S; b – DEBYAK

В исходном состоянии алюминиевая бронза БрА5 представляет собой α -твердый раствор Cu-Al, и его дифрактограммы состоят из одной системы отражений (hkl) рентгеновских лучей, свойственной ГЦК решетке. После трения в масле М9С рентгенограммы зоны деформации бронзы фиксируют систему линий α -твердого раствора Cu-Al с их существенным уширением по сравнению с исходным состоянием (рис. 1, а). Под влиянием эфира ДЭБЯК в зоне деформации происходит концентрационное расслоение бронзы и формирование кристаллографически изоструктурных (т.е. с одинаковыми решетками Браве) твердых растворов Cu-Al, один из которых (α_1) является фазой с меньшим периодом, и, следовательно, обогащен медью.

Следовательно, при деформации модифицирование микроструктуры приповерхностного слоя бронзы происходит в результате двух параллельно протекающих процессов: изменения плотности дислокаций (уширение линий) и диффузионного перераспределения легирующего элемента в зоне контактной деформации трибоматериала (изменение его элементного и фазового состава). Рассмотрим количественные характеристики уровня разрушения поверхностного слоя бронзы и структурных состояний модифицированного слоя.

Временные зависимости износа бронзовых образцов $I_h = f(\tau)$ выявляют важную особенность процесса разрушения поверхности бронзы, интенсивность которого зависит от вида смазочной среды, заключающуюся во влиянии среды на периоды и амплитуды кинетических циклов. При трении в масле период накопления повреждаемости и амплитуда изменения износа достаточно велики, при трении в смеси с загустителем эти характеристики оказываются существенно меньше. Фиксированные во времени значения интенсивности

изнашивания бронзы I_h в двух средах на различных временных интервалах значительно отличаются, в особенности при малых и больших временах работы трибосопряжения (рис. 2).

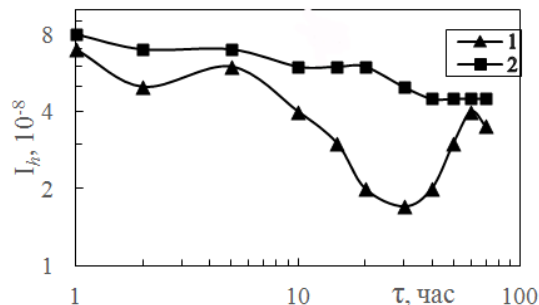


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы от времени испытаний τ :
1 – в масле М9С; 2 – в среде (М9С + 12-ЛеоСт)

Fig. 2. Dependence of the I_h bronze wear intensity on the test time τ :
1 – in M9C oil; 2 – in medium (M9C + 12-LioSt)

Тем не менее, в среднем они близки между собой, хотя на всем временном интервале испытаний наблюдается тенденция более высокого износа образцов при их испытаниях в масле с загустителем. В последнем случае наблюдается устойчивое снижение интенсивности износа с увеличением длительности трибоиспытаний. Интенсивности изнашивания составляют $I_h \approx 4,5 \cdot 10^{-8}$ для смазки М9С + 12-ЛеоСт в режиме, близком к установившемуся (при $\tau = 70$ час), и $I_h \approx 3,5 \cdot 10^{-8}$ для М9С в режиме, все еще далеком от стационарного при том же времени испытаний.

Объемно-временные изменения микроскопических характеристик поверхностного слоя бронзы БрА5 в среде масла М9С и в его смеси с загустителем 12-ЛеоСт представлены в табл. 1 и 2.

1. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$

1. Intrinsic broadening of X-ray lines $\beta_{(311)}$

Толщина слоя h	1 мкм	5 мкм	10 мкм
Значение $\beta_{(311)} \cdot 10^{-3}$, рад.			
До трения	30,0	17,5	14,0
Трение в среде М9С	38,0	22,0	13,5
Трение в смеси (М9С + 12ЛеоСт)	29,0	16,0	12,5

Данные, приведенные в табл. 1, отражают распределение значений физического

уширения рентгеновских линий по толщине слоя деформации бронзы. Поскольку $\rho \sim \beta^2_{(hkl)}$,

они позволяют качественно определить изменение плотности дислокаций ρ . Изменения значений $\beta_{(hkl)}$ указывают на основные процессы, одновременно происходящих при деформации бронзы в исследуемых смазочных средах. Во-первых, плотность дислокаций в слоях, прилегающих к свободной поверхности образцов, возрастает примерно в 1,6 раза при трении в масле М9С по сравнению с исходным состоянием (до трения, шлифованная поверхность), т.е. при трибodeформации образцов в неактивной смазочной среде наблюдается упрочняющий эффект. Во-вторых, присутствие дисперсной фазы 12-LioSt в смазочной системе обеспечивает систематическое понижение плотности

деформационных приповерхностных дислокаций (примерно в 1,7 раза по сравнению с чистой дисперсионной средой и в 1,1 раза по сравнению с исходным состоянием). Таким образом, в результате воздействия загустителя смягчаются энергосиловые граничные условия в трибоконтакте, и в приповерхностном слое трибоматериала реализуется пластифицирующий эффект.

Данные табл.2 иллюстрирует распределения значений периода кристаллической решетки α -твердого раствора по глубине h деформированного слоя приповерхностного слоя тех же трибообразцов.

2. Изменение периода решетки α -твердого раствора Cu-Al (бронза БрА5)

2. Change in the lattice period of the α -solid Cu-Al solution (bronze BrA5)

a , нм	Глубина слоя h , мкм					
	0,6	2,1	3,5	4,7	7,1	9,1
М9С	0,3632	0,3637	0,3637	0,3635	0,3635	0,3636
М9С+12-LioSt	0,3620	0,3643	-	0,3660	0,3652	0,3638

В процессе временной трибodeформации поверхностного слоя бронзы в масле М9С величина периода решетки слабо осциллирует по всей глубине и составляет $\langle a_\alpha \rangle = 0,3632$ нм, что близко к стандартному значению периода решетки бронзы БрА5. Введение в смазочную систему загустителя 12-LioSt приводит к тому, что в процессе фрикционного воздействия в зоне деформации формируется нормальный к поверхности образца интенсивный макроскопический диффузионный поток атомов алюминия, направленный с одной стороны к выходу из образца, а с другой – в его внутриобъемную зону. При этом в слоях глубиной $h \leq 4$ мкм происходит заметное уменьшение периода a вплоть до значений $a_\alpha \approx 0,3620$ нм. Таким образом, в приповерхностном слое трибообразца вблизи межфазной границы металл / смазка создается положительный концентрационный градиент алюминия и, соответственно, положительный градиент механических свойств материала в целом, являющиеся предпосылками для формирования режима повышенной износостойкости такого материала. Полученная в работе [4] оценка происходящих под влиянием адсорбции ПАВ изменений предела текучести приповерхностного слоя, а также вариаций знака и величины остаточных

напряжений, возникающих на разных глубинах этого слоя, дает основания полагать, что именно процессы диффузии атомов алюминия одновременно как в смазку, так и в глубину трибоматериала обеспечивают снижение уровня упрочняющего эффекта в приповерхностном слое бронзы. Однако наблюдающееся увеличение концентрации алюминия в более глубоко залегающих подповерхностных слоях приводит к появлению в зоне деформации сплава горизонтально-протяженных пластинчатых концентрационных неоднородностей. В соответствии с моделью износа [5] это может являться причиной снижения износостойкости антифрикционного материала.

Таким образом, в зоне деформации бронзы при трении в масле М9С, содержащей загуститель, реализуются три ведущих структурных процесса: повышение плотности дислокаций за счет влияния дисперсионной среды – масла (упрочняющий эффект), понижение плотности дислокаций под влиянием дисперсной фазы – литиевого мыла 12-LioSt (пластифицирующий эффект) и реализация макроскопического диффузионного потока атомов алюминия в смазку и во внутриобъемную зону образца, создающий положительный градиент

механических характеристик трибоматериала по глубине зоны деформации.

Результаты испытаний пары в смазке на основе сложных эфиров бензилянтарной кислоты и широкой фракции спиртов C₇-C₁₂

(ДЭБЯК) показали ряд особенностей структуры и свойств бронзы в условиях контактной деформации, связанных с поверхностной активностью дисперсионной среды и дисперсной фазы, рис. 3, табл. 3 и 4.

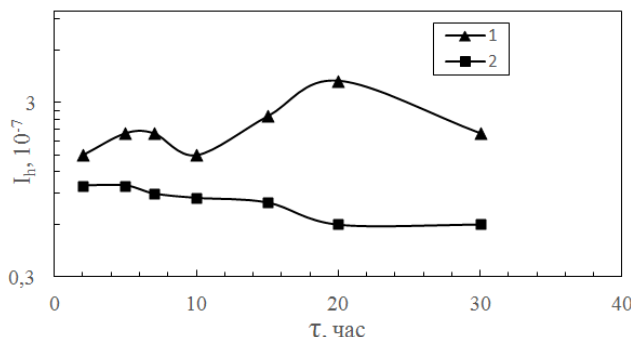


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы БрА5 при трении в смазочных средах ДЭБЯК (1) и ДЭБЯК + 12-LioSt (2) от длительности испытаний τ

Fig. 3. Dependence of the wear intensity I_h of BR5 bronze upon friction in the lubricating media DEBYAK (1) and DEBYAK + 12-LioSt (2) on the duration of the tests τ

Временная зависимость интенсивности изнашивания в смазочной среде ДЭБЯК + 12-LioSt состоит из двух характерных участков – приработки и установившегося режима изнашивания. Износостойкость бронзы в этом случае повышается примерно в 2,5 раза несмотря на то, что на ее поверхности как в первой, так и во втором случаях образуется плотная и твердая пленка оксидов типа алюмината меди

(CuAl₂O₄), имеющих кристаллическую структуру шпинели (по данным рентгенофазового анализа). Эти факты свидетельствуют о более сложных физико-химических и микроструктурных процессах, происходящих в зоне деформации бронзы, которые определяют ее износостойкость. Экспериментальные данные, приведенные в табл. 3 и 4, раскрывают существо этих процессов.

3. Изменение периода решетки структурных составляющих (фаз α и α_1)

3. Change in the lattice period of the structural components (phases α and α_1)

ДЭБЯК	Глубина слоя h , мкм						
	a , нм	0,6	1,5	2,1	4,4	7,1	9,4
	α_1 -фаза	0,3618	0,3618	0,3618	-	-	-
	α -фаза	0,3663	0,3655	0,3650	0,3650	0,3640	0,3640
ДЭБЯК + 12-LioSt	Глубина слоя h , мкм						
	a , нм	1,0	2,5	3,0	4,5	7,1	9,5
	α -фаза	-	0,3640	-	0,3640	-	0,3640
	α_1 -фаза	0,3615	0,3623	-	0,3630	-	0,3631

Особенность деформации в поверхностно-активной смазочной среде состоит в том, в приповерхностном слое материала в результате распада первичного α -твердого раствора Cu-Al под влиянием возникающих в нем значительных остаточных упругих напряжений формируются две вторичные фазы α и α_1 . Они являются кристаллографически изоструктурными материнскому твердому раствору

БрА5, т.е. сохраняют одинаковые с ним решетки Браве, но имеют отличные от него периоды решетки. Так, фаза α имеет больший по сравнению с α -фазой БрА5 период решетки a и, следовательно, обогащена алюминием, фаза α_1 имеет заметно меньший, чем фаза α , период и обогащена медью.

Иная структурная картина возникает в приповерхностном слое бронзы при трении в

смазочной среде ДЭБЯК + 12-LioSt. Присутствие в смазке загустителя (более активного ПАВ, чем эфир) вызывает немедленное адсорбционное понижение прочности образующейся поверхностной оксидной пленки (1-я форма эффекта Ребиндера) и ее хрупкое растрескивание. При этом активная смазка, проникает к поверхности бронзы и пластифицирует ее приповерхностный слой. В результате трибоздействия в нем возникают остаточные напряжения сжатия [4]. В результате происходит спинодальный распад этого раствора на две новые более устойчивые фазы α и α_1 с разными концентрациями Cu и Al. Обогащенная медью вторичная фаза α_1 , формируется по всей модифицированной зоне. В этой фазе реализуется положительный градиент концентрации алюминия по глубине слоя. Присутствие

вторичной фазы α в поверхностном слое материала оказывается заметным лишь на достаточной его глубине, при $h \geq 2$ мкм. В этом интервале глубин h она сохраняет постоянное значение периода $a = 0,3640$ нм, которое заметно превышает исходное равновесное значение периода решетки бронзы БрА5.

Анализ совокупности свойств фаз α_1 и α дает основания полагать, что формирование при трении бронзы в среде ДЭБЯК + 12-LioSt обогащенной медью фазы α_1 , обладающей положительным градиентом микроструктурных характеристик по толщине модифицированной зоны, способствует повышению износостойкости бронзы.

Рассмотрим характеристики дислокационной структуры материала в зоне контактной трибодформации (табл. 4).

4. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ бронзы БрА5

4. Intrinsic broadening of the $\beta_{(311)}$ bronze BrA5 X-ray lines

Толщина слоя h , мкм	1	5	10
Значение $\beta_{(311)}$, 10^{-3} рад.			
До трения	30,0	17,5	13,0
Трение в среде ДЭБЯК, α -фаза	25,5	17,0	12,0
Трение в среде ДЭБЯК, α_1 -фаза	27,0	-	-
Трение в среде (ДЭБЯК + 12-LioSt), α -фаза	24,0	14,3	12,0
Трение в среде (ДЭБЯК + 12-LioSt), α_1 -фаза	36,0	28,0	13,0

Анализ представленных в табл. 4 данных показывает, что эфир ДЭБЯК снижает плотность дислокаций в обеих вторичных фазах по сравнению с исходным однофазным состоянием материала. При этом уровень снижения плотности дислокаций в обогащенных медью фазе α_1 ниже, чем в фазе α , обогащенной алюминием. Композиционная смазочная среда ДЭБЯК + 12-LioSt усиливает эффект снижения плотности дислокаций в α_1 -фазе, однако в фазе α на глубинах $h \leq 5$ мкм общая плотность дислокаций существенно увеличивается до значения, которое превышает значение этой характеристики не только при трении в чистом эфире, но и в исходном (до трения) состоянии. Таким образом, прямое физико-химическое влияние активной смазочной среды на структуру и свойства бронзы приводит к неоднозначным результатам: обогащенная медью фаза α_1 относительно пластифицируется, а фаза α – упрочняется. Наличие упрочненных фаз в приповерхностном слое трибоматериала

является основной причиной, тормозящей процесс формирования структуры, обеспечивающей высокую износостойкость, характерную для явления избирательного переноса [7, 8], рис. 3, кривая 2.

При производстве промышленных пластичных смазочных материалов применяется смесь дисперсионных сред М9С и ДЭБЯК в сочетании с дисперсной фазой 12-LioSt. Основываясь на приведенных выше экспериментальных данных, свидетельствующих о влиянии физико-химических факторов компонентов смазки на структуру и свойства бронзы в условиях контактной деформации, а также результаты, опубликованные в [9], рассмотрим изменения характеристик модифицированного слоя, связанных с ролью композиционной смазки в целом.

Совокупность микроскопических характеристик антифрикционного сплава (бронза БрА5), полученных по результатам испытаний

в смеси М9С + ДЭБЯК и смазке М9С + ДЭБЯК + 12 % 12-LioSt представлена в табл. 5 и 6.

5. Физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ бронзы БрА5

5. Intrinsic broadening of the $\beta_{(311)}$ bronze BrA5 X-ray lines

Толщина слоя h , мкм	1 мкм	5 мкм	10 мкм
Значение $\beta_{(311)} \cdot 10^{-3}$ рад.			
До трения (шлифованная поверхность), Cu-Al	30,0	17,5	13,0
Трение в смеси (М9С + ДЭБЯК), фаза α	22,5	15,0	14,0
Трение в смеси (М9С + ДЭБЯК), фаза α_1	40,0	35,0	17,5
Трение в смазке (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt), фаза α	22,0	16,0	14,0
Трение в смазке (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt), фаза α_1	38,5	35,5	17,0

При трении в смеси М9С + ДЭБЯК структурные составляющие α и α_1 деформированного слоя, образующиеся в результате концентрационного расслоения бронзы при трибодеформации в активной среде, имеют различные значения структурного параметра, $\beta_{(311)} \sim \rho^{0.5}$. Для обогащенной алюминием α -фазы величина $\beta_{(311)}$ и, следовательно, общая плотность дислокаций ρ оказываются меньше, чем их значения для исходного сплава. Для α_1 -фазы, обогащенной медью, значения $\beta_{(311)}$ и ρ существенно выше по сравнению с их значениями не только в исходном состоянии бронзы, но и с этими характеристиками для фазы α , содержащей более высокую концентрацию алюминия. Присутствие в смазке загустителя 12-LioSt незначительно снижает величины $\beta_{(311)}$ и ρ в этих фазах. Таким образом, можно

полагать, что сочетание эфира ДЭБЯК с синтетическим маслом М9С и загустителем по существу не изменяет характер физико-химического влияния среды на процессы трибодеформации, происходящие в приповерхностном слое материала (по сравнению с испытаниями в смесях с одной дисперсионной средой): наблюдается как пластифицирующий эффект, так и упрочняющий с превалирующим действием последнего (изменяются лишь количественные характеристики).

При испытаниях пары в средах на основе смеси (М9С + ДЭБЯК в поверхностном слое бронзы также возникает макроскопический диффузионный поток атомов алюминия, приводящий к концентрационному расслоению исходного сплава (табл. 6).

6. Изменение периода решетки структурных составляющих фаз α и α_1

6. Change in the lattice period of the structural components of phases α and α_1

(М9С + ДЭБЯК)	a , нм	Глубина слоя h , мкм				
		0,5	2,0	3,5	5,0	9,3
	α -фаза	0,3623	0,3625	0,3623	0,3623	0,3623
	α_1 -фаза	0,3595	0,3595	0,3595	0,3595	0,3595
(М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt)	a , нм	Глубина слоя h , мкм				
		0,5	2,0	3,5	5,0	9,3
	α -фаза	0,3630	0,3630	0,3630	0,3630	0,3630
	α_1 -фаза	0,3595	0,3582	0,3600	-	-

Периоды кристаллической решетки относительно обогащенных алюминием вторичных фаз α в обеих смазочных средах достаточно близки, т.е. добавка загустителя в смазку практически не влияет на состав слоя и уровень остаточных напряжений в нем. Однако, загуститель ограничивает массовую интенсивность пространственного расслоения исходного

твердого раствора по глубине h : обогащенная медью фаза α_1 рентгеновски визуализируется лишь в поверхностном слое материала толщиной $h \leq 3,5$ мкм.

Следует отметить, что экспериментально обнаружено периодическое появление и разрушение оксидов со структурой шпинели – алюминатов меди CuAl_2O_4 на поверхности

трения в среде (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt). При трении в смазочной среде с загустителем интенсивность линий на рентгенограммах, соответствующих этому оксиду, значительно выше, чем при трибоиспытаниях без загустителя. Это указывает на их относительно большее массовое (объемное) содержание в первом случае, что может являться причиной более высокого уровня разрушения поверхности при испытаниях в такой трехкомпонентной смазке. Этот вывод подтверждается зависимостями интенсивности изнашивания от времени (рис. 4).

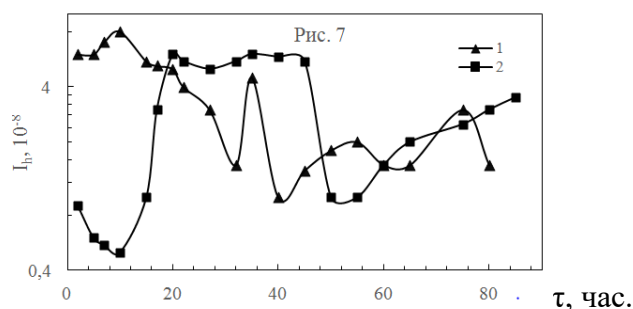


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания I_h бронзы БрА5 от времени испытания τ :
1 – смесь (М9С + ДЭБЯК); 2 – смазка (М9С + ДЭБЯК + 12-LioSt)

Fig.4. Dependence of the wear intensity I_h of BR5 bronze on the test time τ :
1 – mixture (M9C + DEBAK); 2 – lubricant (M9C + DBAK + 12-LioSt)

Колебательный характер процесса изнашивания в обеих средах с характерными максимумами и минимумами величины I_h представлен на рис. 4. При этом амплитуда и период колебаний величины I_h при испытаниях в смазке с загустителем оказываются существенно большими.

Таким образом, проведенные исследования показали, что особенности влияния дисперсионной среды и загустителя на процессы контактного взаимодействия металлических пар трения и их работоспособность в условиях реверсивного трения скольжения взаимосвязаны с физическими и химическими свойствами составляющих смазочной среды. Литевой мыло 12-оксистеариновой кислоты не только формирует структурный каркас пластичного смазочного материала, но и активно, так же как и дисперсная фаза, влияет на физико-химические процессы в зоне деформации трибометалла, изменяя структуру и свойства его поверхностного слоя и тем самым влияет на сопротивление изнашиванию трибопары в целом.

Закключение

Совокупность экспериментальных данных по интенсивности изнашивания в сопоставлении с характеристиками структурного состояния зоны деформации на примере бронзы БрА5 в нагруженном скользящем сопряжении в паре со сталью 45 показала, что наиболее полную оценку влияния физико-химических факторов на структуру и свойства металлов в условиях контактной деформации при трении в поверхностно-активной смазочной среде можно получить, используя критериальные подходы, отражающие разные масштабно-иерархические уровни работы трибосистемы: это макроскопический интегральный критерий – интенсивность изнашивания, и микроскопические структурные критерии – физическое уширение рентгеновских линий, которое определяет плотность дислокаций и уровень микронапряжений в деформированном металле, и период кристаллической решетки, определяющий уровень микронапряжений в металлическом материале и его элементный состав. Такой подход позволяет в целом оценивать качество работы узла трения, совместимость конструкционных и смазочных материалов, обоснованно назначать состав смазочного материала.

При трении в активном смазочном материале контактная деформация сопровождается характерными структурными превращениями: повышением плотности дислокаций за счет влияния дисперсионной среды, вызывающей при трибodeформации упрочняющий эффект; понижением плотности дислокаций под влиянием дисперсной фазы, создающей пластифицирующий эффект; реализацией макроскопического диффузионного потока алюминия к поверхности, характеризующийся положительным градиентом по глубине слоя и выявляющей тенденцию формирования износостойкого структурного состояния; окислением поверхности трения и образованием оксидов разного типа.

Направление и скорость физико-химических процессов в зоне контакта, а также интенсивность поверхностного разрушения материала зависят от внешних нагрузочно-скоростных параметров процесса, температуры в зоне трения, состава и структуры контактирующих металлических материалов, природы и свойств компонентов смазочной среды. Этот комплекс характеристик трибосопряжения взаимообусловленно влияет на деформационные процессы в зоне контакта, формируя структурное

состояние поверхностного слоя трибоматериала, зависящее от физико-химического действия смазки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Журков С.Н.** К вопросу о физической основе прочности // ФТТ. 1980. Т. 22. Вып. 2. С. 3344–3349.
2. **Громаковский Д.Г.** Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения. 2000. № 1. С. 3–9.
3. **Савенко В.И., Щукин Е.Д.** О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. 1987. Т. 8. № 4. С. 581–589.
4. **Савенко В.И.** Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. № 3–4. С. 26–38.
5. **Suh N.P.** The delamination theory of wear // Wear, 1973. V. 25. No1. P. 111–124.
6. **Куксенова Л.И., Савенко В.И.** Физико-химическая механика поверхностных слоев антифрикционного материала, функционирующего в поверхностно-активной смазочной среде // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. Т. 60. № 2. С. 81–96.
7. **Кужаров А.С., Кужаров А.А.** Избирательный перенос: мифы и реалии // Вестник РГУПС. 2011. № 4. С. 43–51.
8. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение. 212 с.
9. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformation of Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics

// Russian Journal of Physical Chemistry A. 2024. V. 98. No 7. P. 1411–1424.

REFERENCES

1. **Zhurkov S.N.** Determining the physical nature of the strength // FTT. 1980, vol.22, Issue 2, pp. 3344–3349.
2. **Gromakovsky D.G.** Destruction of surfaces by friction and development of a kinetic model of wear // Bulletin of Mechanical Engineering. 2000, no. 1, pp. 3–9.
3. **Savenko, V.I., Shchukin, E.D.**, On the relations between phenomenological and structural criteria of friction unit operation, Trenie Iznos, 1987, no. 4, pp. 581–589.
4. **Savenko, V.I.**, The role of the Rebinder effect in the implementation of the wear-free regime in tribological engineering // Effekt Bezyznosn. Tribotekhnol., 1994, no. 3–4, pp. 26–38.
5. **Suh N.P.** The delamination theory of wear // Wear, 1973. V.25. No1. P. 111–124.
6. **Kuksenova L.I., Savchenko V.I.** Physical-chemical mechanics of surface layers of an antifricition material operating in a surface-active lubricating medium // Physics-chemistry of the surface and protection of materials. 2024, vol.60, no. 2, pp. 81–96.
7. **Kuzharov A.S., Kuzharov A.A.** Selective transfer: Myths and realities // Bulletin of the Russian State Pedagogical University. 2011, no.4. pp. 43–51.
8. **Rybakova L.M., Kuksenova L.I.** Structure and wear resistance of metal. Moscow: Mashinostroyeniye, 212 p.
9. **Kuksenova L.I., Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformation of Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2024. V. 98. No7. P. 1411–1424.

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025

The article was submitted 25.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2025. Выход в свет 30.05.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+