

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА СОСТАВА ЛАТУНЕЙ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В СРЕДЕ ПОВЕРХНО- АКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лидия Ивановна Куксенова¹, Сергей Андреевич Поляков^{2,1}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

serpol50z@rambler.ru

Аннотация. Масштаб применения медных сплавов для триботехнических целей постоянно расширяется, что связано с возможностью реализации в парах трения явления избирательного переноса, обеспечивающего существенное повышение их работоспособности. Представлены характеристики структурного состояния зоны контактной деформации при трении латуней в среде активных смазочных материалов. Установлено, что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых латуней необходима гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока, направленного к свободной поверхности зоны контактного взаимодействия, сопровождающийся растворением легирующих элементов сплава в смазочной среде. Для промышленных сплавов, применяемых в триботехнике, эта область ограничена, как правило, пятью-восемью процентами цинка. Предложена модель, описывающая роль механохимических и хемомеханических эффектов, возникающих при трении в поверхностно-активной смазочной среде, определяющих комплекс структурных превращений в зоне деформации и реализацию явления избирательного переноса.

Ключевые слова: медные сплавы, латуни, структура, контактная деформация, трение, износ, поверхностно-активные смазочные материалы, явление избирательного переноса.

METHODOLOGICAL BASES FOR CHOOSING THE COMPOSITION OF BRASSES FOR SLIDING FRICTION UNIT IN THE ENVIRONMENT OF SURFACE-ACTIVE LUBRICANTS

Lidiya I. Kuksenova¹, Sergey A. Polyakov^{2,1}

¹Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Engineering named
after. A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

²MSTU im. N.E. Bauman, Moscow, Russia

serpol50z@rambler.ru

Abstract. *The scale of application of copper alloys for tribological purposes is constantly expanding, which is associated with the possibility of implementing the phenomenon of selective transfer in friction pairs, which provides a significant increase in their performance. The characteristics of the structural state of the contact deformation zone during friction of brass in the medium of active lubricants are presented. It has been established that to ensure extremely high tribotechnical characteristics of traditionally used brasses, the homogeneity of the alloy and the corresponding concentration range of the solubility of the alloying element in the solid state are necessary, which allows the development of a macroscopic diffusion flow directed to the free surface of the contact interaction zone, accompanied by the dissolution of the alloying elements of the alloy in the lubricating medium. For industrial alloys used in tribotechnics, this area is usually limited to five to eight percent zinc. A model is proposed that describes the role of mechanochemical and chemomechanical effects arising from friction in a surface-active lubricating medium, which determine the complex of structural transformations in the deformation zone and the implementation of the selective transfer phenomenon.*

Key words: *copper alloys, brass, structure, contact deformation, friction, wear, surface-active lubricants, selective transfer phenomenon.*

Введение. Проблема повышения надежности, долговечности и безопасности эксплуатации машин тесно связана с задачами обеспечения работоспособности узлов трения, износостойкости конструкционных материалов, их совместимости в триаде трения. Однако при конструировании узлов и их изготовлении сопротивляемость износу материалов чаще всего рассматривается как узкоспецифическое свойство по отношению к внешнему воздействию, а выбор материалов осуществляется в соответствии с разнообразными технологическими и экономическими требованиями.

Объемы применения меди и медных сплавов в качестве антифрикционных материалов постоянно увеличиваются, что обосновано положительным эффектом при трении, связанным с реализацией правила положительного градиента механических свойств по толщине поверхностного слоя в условиях контактной деформации и явления избирательного переноса (практической безызносности). Результаты научных исследований выявили несколько направлений наиболее эффективного применения этих материалов для триботехнических целей: в качестве основного антифрикционного сплава в парах трения медный сплав - сталь; покрытия в парах трения из разных конструкционных материалов; пленок, получаемых в условиях штатной эксплуатации в разных средах, в частности, в металлоплакирующих смазочных материалах. Они выявили разнообразие технических решений, способствующих изменению износостойкости материалов узлов трения. Однако эффекты применения этих решений часто оказываются противоречивыми. Есть основания полагать, что среди многообразия причин получения несопоставимых результатов особое место занимает отсутствие методологии выбора состава антифрикционного материала (медного сплава) с учетом конкретных условий эксплуатации.

Известно, что износостойкость материала зависит от характеристик механических свойств и прежде всего от его твердости, которая в свою очередь определяется элементным составом сплава. Поэтому в условиях граничной смазки при смазывании инактивным смазочным материалом, например, индустриальным маслом, износостойкость бронзы БрАЖ9-4 оказывается примерно на 30% выше, чем бронзы БрОЦС5-5-5. При трении в пластичном смазочном материале Солидол износостойкость БрАЖ9-4 в два раза выше, чем БрОЦС5-5-5 (при прочих одинаковых условиях) [1,2]. Опыт экспериментальных исследований показывает, что в условиях смазывания активным смазочным материалом может произойти

инверсия рядов износостойкости, что обусловлено изменением других характеристик механических свойств, в первую очередь, пластичности приповерхностных слоев материалов [3].

Ряд новых отраслей науки, возникших в XX веке, в первую очередь, физико-химическая механика материалов [4], позволили сформулировать условия, при которых механические свойства материалов могут существенно меняться под воздействием среды, в том числе, в направлении многократного повышения пластичности. При этом трибологические исследования показали, что влияние активной среды проявляется в комплексном воздействии на механические свойства материалов в связи с механохимическими, хемомеханическими и диффузионными эффектами [3,5,6]. Износостойкость, оцениваемая через величину, обратную интенсивности изнашивания, существенно изменяется при реализации указанных эффектов через характеристику пластичности.

Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки имеет, как правило, степенную форму, а ее наиболее простой вариант имеет вид:

$$I_h = \kappa P^m,$$

где I_h – интенсивность изнашивания; κ – размерный коэффициент, характеризующий механические свойства материала и геометрические характеристики изнашиваемой детали, пронормированный на длину пути трения: $\kappa = A_{\text{ном}}/2\pi r H V n$, $A_{\text{ном}}$ – номинальная площадь контакта, r – средний радиус закругления шероховатости, $H V$ – твердость, n – характеристика пластичности; P – отношение нормальной нагрузки к номинальной площади контакта (среднее номинальное давление); m – показатель степени, учитываемый в случае нелинейности зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки. Для оценки пластичности часто используют величину предельной деформации при разрыве, однако эта характеристика недостаточна в условиях поверхностной (контактной) деформации при трении [3]. Поэтому авторами данной работы величина n интерпретируется как соотношение между фактической и максимально допустимой деформацией при трении, определяемой специальным рентгенографическим методом послойного неразрушающего анализа зоны деформации металла при трении [6].

Из выражения для величины κ видно, что увеличение значений твердости и пластичности приводит к уменьшению интенсивности изнашивания. Однако, если твердость в результате термической обработки может изменяться в 1,5–2 раза, то пластичность приповерхностных слоев в результате действия активной смазочной среды и формирования динамической структуры в условиях контактной деформации может изменяться на порядки [3,5,7]. При этом одной из важных составляющих формирования такой структуры в медном сплаве является фазовый состав и совокупное количество легирующих элементов.

Данная работа посвящена обобщению экспериментальных результатов исследований структурных изменений и триботехнических свойств распространенных латуней с позиций влияния количества легирующих элементов и фазового состава на износостойкость сплава в условиях трения скольжения в активной смазочной среде с учетом механохимических и хемомеханических эффектов, возникающих в процессе контактной деформации с целью разработки методологических основ выбора медного сплава триботехнического назначения для эксплуатации в условиях поверхностно-активной смазочной среды.

Материалы и методики исследования. В качестве объекта исследования была выбрана пара реверсивного трения скольжения сплав Cu-Zn – сталь в поверхностно- активной смазочной среде. Испытания проводили на машинах трения МТ-1 и МТ-8 с возвратно-поступательным движением плоских поверхностей. Выбранная схема испытаний

характеризуется тем, что поверхности трения испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций, интенсифицирующих механохимические, хемомеханические процессы и эффект пластифицирования, что в совокупности позволяет наиболее достоверно выявить роль природы смазочной среды в условиях поверхностной контактной деформации. Дополнительно использовали методику испытаний на машине АЕ-5, которая соответствует ГОСТ 23.224-86 и позволяет определять коэффициент трения f и интенсивность изнашивания I_h при скольжении трех пальчиковых образцов из сплавов Cu-Zn по стальному диску. Выбор антифрикционных сплавов основывался на особенностях кривой растворимости легирующего элемента в меди в твердом состоянии. Так как сплавы Cu-Zn являются преимущественно однофазными примерно до 39% Zn, то испытывались латуни Л90, Л80, Л68, Л63, а также специально изготовленные сплавы с содержанием цинка 3, 8, 15, 30, 39, 43, 46, 50, 55, 93 % мас.

Структурное состояние поверхностей трения анализировали с помощью методов световой и электронной микроскопии, Оже-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, микротвердости. Наибольшее количество экспериментальных результатов, представленных в статье, получено с помощью рентгеноструктурного анализа как наиболее информативного для изучения структурных изменений, определяющих механические характеристики металла; при этом рентгено съемки в Co-K α излучении проводились с помощью специального метода, позволяющего послойно сканировать зону контактной деформации при трении, не подвергая ее разрушению [6]. Для анализа особенностей структуры поверхностных слоев пары трения с позиций трибологического материаловедения использовали экспериментально полученную совокупность макроскопических критериев (показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (физическое уширение рентгеновских линий материала зоны контактной деформации, отражающей плотность дефектов дислокационной природы, характеристики механических свойств материала зоны деформации, а также период кристаллической решетки, отражающий изменение элементного и фазового состава). Анализ проводился на основе связи между феноменологическими и структурными критериями состояния материала зоны контактной деформации, установленной в рамках системно-структурного подхода [8].

Результаты и их обсуждение. С позиций износостойкости как структурно-чувствительного свойства многообразие существующих способов повышения износостойкости металлических материалов условно делят на две основные группы: способы направленного воздействия на поверхность трущихся тел и способы, в основе которых заложен принцип реализации внутренних субструктурных резервов материалов в условиях контактной деформации. Практика триботехнических испытаний при возрастающих требованиях поиска методов и средств повышения надежности и долговечности узлов трения указывает на особую актуальность комплексного использования внутренних резервов традиционно применяемых конструкционных материалов триботехнического назначения при трении в поверхностно-активных смазочных средах. Ярким таким примером является реализация в паре трения явления избирательного переноса, приводящего пару трения в режим практической безызносности [9].

Рассмотрим основные структурные изменения в зоне контактной деформации при трении по стали в поверхностно-активной смазочной среде медных сплавов Cu-Zn с широкой областью растворимости основного легирующего элемента в твердом состоянии.

На рис.1 приведено изменение периода кристаллической решетки сплавов Cu-Zn (латуней) по глубине поверхностных слоев в исходном состоянии, кривые 1, и деформированных при трении в среде глицерина, кривые 2,3 (известно, что глицерин в результате трибохимических

реакций становится поверхностно-активной пластифицирующей средой по отношению к латуни). Видно, что происходит существенное изменение как состава α -твердого раствора, так и фазового состава зоны деформации в целом. Можно отметить следующие особенности:

- в отличие от исходного состояния (кривые 1) в результате трения поверхностный слой является многослойным материалом, состоящим из сформировавшегося в результате трения слоя меди (кривые 2) и слоя α -твердого раствора цинка в меди с измененным параметром решетки (кривые 3). Наличие поверхностной пленки меди подтверждено анализом с помощью световой и электронной микроскопии, ее состав – с помощью микроспектрального анализа [6];

- причина формирования двухслойной структуры связана с тем, что в поверхностном деформированном слое возникают значительные сжимающие напряжения первого рода, поэтому вследствие различия атомных объемов цинка и меди (~28%) цинк из поверхностного пластифицированного слоя удаляется, создается макроскопический диффузионный поток, направленный к поверхности контакта, формируя пленку чистой меди [10];

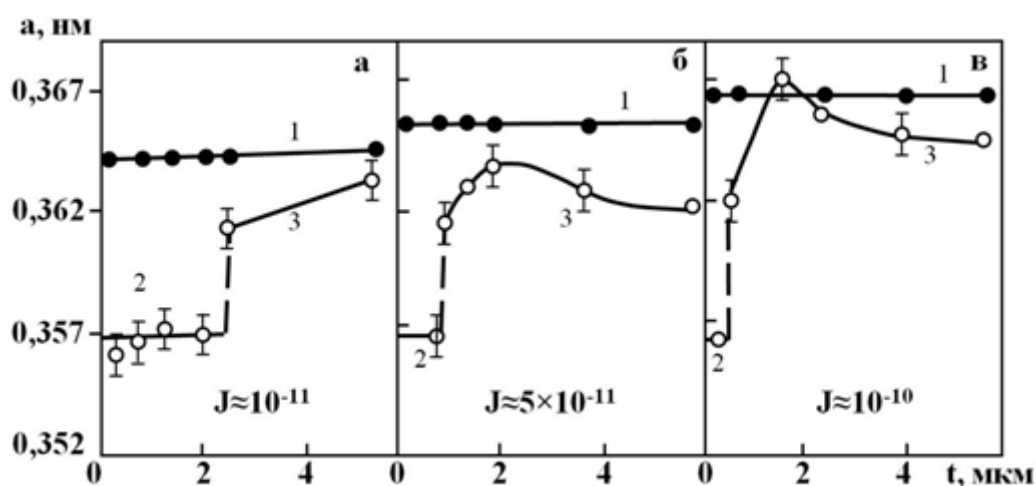


Рис.1. Изменение периода кристаллической решетки α -твердого раствора латуней по глубине зоны деформации при трении в среде глицерина ($P=10$ МПа): а – Л90; б – Л80; в– Л63. 1 – α -твердый раствор до трения; 2 – пленка меди, 3 – α -твердый раствор после трения

- в подповерхностном слое, рис.1, кривые 3, формируется положительный градиент параметра решетки латуни, что свидетельствует об обеднении этого слоя атомами цинка в результате процесса восходящей диффузии, стимулированной сжимающими внутренними напряжениями в зоне деформации при трении, и растворением их в поверхностно-активной смазочной среде [10];

- при трении латуни Л90 (рис.1а) толщина пленки меди составляет ~2 мкм, а в подповерхностном слое с увеличением глубины происходит равномерное увеличение концентрации цинка до значений, характерных исходному состоянию;

- в сплавах с более высокой концентрацией цинка (латуни Л80 и Л63), рис.1б,в, также создается двухслойная структура зоны деформации, однако толщина пленки меди существенно меньше (~1 мкм в Л80 и ~0,5 мкм в Л63). В этих сплавах кривая изменения периода решетки твердого раствора с увеличением толщины анализируемого слоя имеет максимум в глубине зоны контактной деформации, что указывает на формирование локальных неоднородностей сплава по химическому составу и является причиной

экспериментально наблюдаемого увеличения интенсивности изнашивания: Л90 – $I_h \sim 10^{-11}$; Л80 – 10^{-10} , Л63 – 10^{-9} (при давлении 10 МПа).

В табл. 1 в качестве сравнения приведены данные по изменению концентрации легирующих элементов в поверхностных слоях сплавов Cu-Zn при сухом трении [11,6].

Таблица 1

Концентрация легирующего элемента

Сплав	Средняя концентрация легирующего элемента в растворе, % масс.		Увеличение концентрации элемента, %
	Исходное состояние	После трения	
Cu – Zn	26,1 ± 0,04	27,2 ± 0,2	4,2
Cu - Zn	20,1 ± 0,3	20,6 ± 0,4	2,5
Cu - Zn	8,0 ± 0,3	8,5 ± 0,3	6,2

В отличие от трения в среде активного смазочного материала, когда имеет место значительное снижение концентрации цинка в сплаве вплоть до образования пленки чистой меди, в условиях сухого трения [11,12] и трения в неактивной смазочной среде [6], наоборот, происходит увеличение концентрации легирующих элементов в поверхностном слое, что является, как показано в [13], результатом упругого взаимодействия атомов растворенного вещества с дислокациями, генерируемыми в процессе трения.

Рассмотрим результаты испытаний на износ сплавов Cu-Zn в среде глицерина. В табл. 2 приведены данные по интенсивности изнашивания специально изготовленных сплавов Cu-Zn.

Таблица 2

Интенсивность изнашивания сплавов Cu-Zn

Давление, МПа	Концентрация цинка, % масс.				
	3	8	30	43	50
3,1	$1,8 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-9}$
7,5	$1,2 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$

Видно, что с увеличением концентрации цинка в сплаве растет интенсивность изнашивания. Наибольшая износостойкость соответствует сплаву с низкой концентрацией цинка. Следует отметить, что для сплавов, состав которых соответствует области концентраций от 3 до 30% Zn, интенсивность изнашивания снижается с ростом нагрузки. Это свойство является отличительным признаком эффекта избирательного переноса, поэтому реализация в паре трения этого явления дает наилучший результат при эксплуатации тяжело нагруженных узлов.

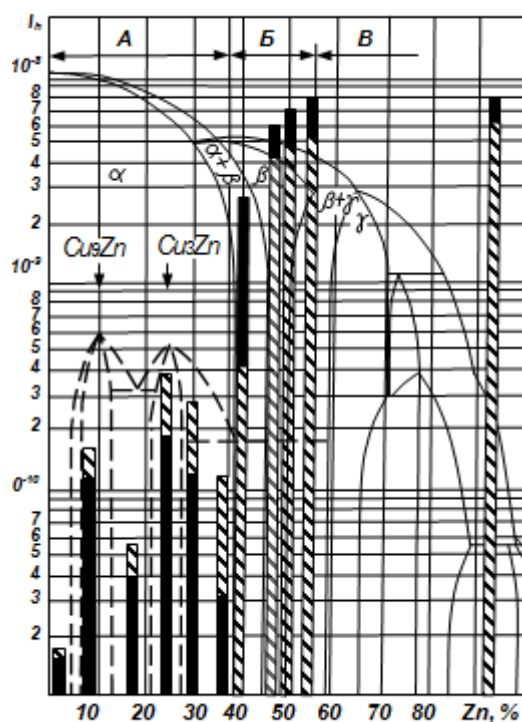


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания латуней (показана столбиками) от содержания цинка на фоне диаграммы состояния медь – цинк (в среде глицерина): зачерненная часть столбика – интенсивность изнашивания при давлении 7,5 МПа, заштрихованная – 3,1 МПа [14]

На рис.2 приведены гистограммы интенсивности изнашивания сплавов разного элементного и фазового состава в зависимости от концентрации сплавов на фоне диаграммы состояния Cu-Zn. Для варьирования концентрации легирующего элемента использовался набор латуней с различным содержанием цинка – 3, 8, 15, 23, 30, 39, 43, 46, 50, 55 и 93% [14].

Как следует из рис.2, в области А (то есть от 0 до 39% цинка) имеет место конверсия износостойкости по отношению к нагрузке – с ростом нагрузки интенсивность изнашивания уменьшается. Высокая износостойкость ($I_h \sim 10^{-11}$) соответствует только концентрации менее 5%, что соответствует области оптимального проявления явления избирательного переноса.

Причина этого – в механизме избирательного растворения, который, приводя к растворению в смазочной среде цинка, создает условия для формирования медной пленки. Следует особенно подчеркнуть, что даже в области α -твердого раствора (до $\sim 39\% \text{Zn}$, участок А на рис.2) наблюдается немонокотное изменение уровня поверхностного разрушения при трении; причем в области концентраций цинка, соответствующих составам Cu_9Zn и Cu_3Zn наблюдается наиболее высокий износ. В концентрационных областях Б и В (концентрация цинка более 39%, рис.2), износ сплавов Cu-Zn увеличивается практически на два порядка.

Анализируя диаграмму состояния Cu-Zn и интенсивности изнашивания сплавов в широком диапазоне концентраций цинка, рис.2, в совокупности с результатами структурных изменений в зоне контактной деформации при трении, рис.1, можно полагать, что

формирование структурной неоднородности в подповерхностном слое, входящем в состав зоны деформации, создает предпосылки формирования новых структурных составляющих типа Cu_9Zn , Cu_3Zn и др., которые приводят к повышению твердости и понижению пластичности поверхностного слоя, в результате уровень поверхностного разрушения материала значительно повышается. Следовательно, при назначении латуни для пары трения антифрикционный сплав – сталь в среде активного смазочного материала целесообразно отдавать предпочтение сплавам с минимальной концентрацией цинка, которая соответствует области α - твердого раствора $Cu-Zn$, в которой реализация локальных микродиффузионных процессов мало вероятно; для этих сплавов при трении на поверхности формируется высокопластичная медная пленка и реализуется стабильный режим высокой износостойкости.

При трении в поверхностно-активной среде механохимические и хемомеханические эффекты представляют собой результаты совместного действия механических и химических факторов, возникающих в силу того, что механическое воздействие ускоряет, активизирует химические реакции, а химическое взаимодействие на поверхности, в частности, избирательное растворение легирующих элементов, через изменение структуры влияет на механические свойства материала.

Для описания указанных эффектов при контактной деформации была предложена модель, основанная на термодинамической концепции, в которой учитываются перекрестные эффекты. В частности, если в системе уравнений неравновесной термодинамики в качестве характеристического параметра (параметра оптимизации) рассматривается скорость пластической деформации, то влияние активности среды может учитываться членом, содержащим величину химического потенциала, возникающего при совместном действии деформации и среды. Введя коэффициенты, принятые для изотермической задачи и включающие температуру как коэффициент типа ΣL_{ij} , получаем уравнения в виде:

$$d\varepsilon_i/dt = \Sigma L_{ij} \Delta\tau_j - \Sigma L_{ij} \Delta\mu_j \quad (1)$$

$$dn_i/dt = \Sigma L_{ij} \Delta\mu_j - \Sigma L_{ij} \Delta\tau_j, \quad (2)$$

где $d\varepsilon_i/dt$ – скорость пластической деформации, $\Delta\tau_j$ – градиент напряжений в приповерхностных слоях материала, $\Delta\mu_j$ – градиент химического потенциала, возникающий в области контакта в связи с деформацией и действием среды, dn_i/dt – скорость химического процесса.

Уравнения (1) и (2) представляют физически обоснованную математическую модель, в которой входными факторами являются термодинамические силы, а соответствующие потоки – параметрами оптимизации. Однако замерять в процессе трения параметры $d\varepsilon_i/dt$ и dn_i/dt затруднительно, поэтому целесообразно найти удобный для определения эквивалент одной из этих величин. Как показано в [15], на эту роль можно предложить коэффициент трения. С этой целью проводили испытания на трехпальчиковой машине; указанные материалы приведены в табл.3.

Таблица 3

Входные факторы при планировании эксперимента

Уровни варьирова- ния	Входные факторы							
	Давление		Упрочняемость мягкого материала (бронзы, безраз- мерная)		Активность смазочного материала (безразмерная)		Упрочняемость твердого материала (стали, безразмерная)	
Обозна- чение, размер- ность	Нату- ральное	Кодовое	Нату- ральное	Кодовое	Нату- ральное	Кодовое	Нату- ральное	Кодовое
	P, МПа	γ_1	$\psi (\Delta\mu_1)$	γ_2	$\Delta\mu_2$	γ_3	$\psi (\Delta\mu_3)$	γ_4
Верхний	20	1	6(медь)	1	Глице- рин	1	6 30ХГСА	1
Нижний	10	-1	2(брон- за)	-1	МС-20	-1	2 Х18Н9Т	-1

Было разработано соответствующее регрессионное уравнение, представляющее собой такую математическую модель, в которой в качестве параметра оптимизации взят коэффициент трения f . Оно было получено путем преобразования уравнения (1) к виду обычного регрессионного уравнения, используемого при планировании эксперимента, т.е. с добавлением нулевого коэффициента β_0 , регрессионных коэффициентов типа β_k вместо L_{ij} и перекрестных членов типа $\sum \beta_{km} \mu \Delta\tau_k \Delta\mu_m$:

$$f = \beta_0 + \sum \beta_k \Delta\tau_k + \sum \beta_m \Delta\mu_m + \sum \beta_{km} \mu \Delta\tau_k \Delta\mu_m, \quad (3)$$

$$\text{где } \beta_k \Delta\tau_k = \sum L_{ij} \Delta\tau_j, \quad \beta_m \Delta\mu_m = \sum L_{ij} \Delta\mu_j.$$

Суммирование в уравнении регрессии относится к различным способам варьирования входных факторов. Так, $\Delta\tau_k$ можно варьировать как нагрузкой, так и подбором материала по степени фрикционного упрочнения ψ . Входящие факторы в уравнении получены из термодинамических соотношений, которые, в свою очередь, сформулированы на основе рассмотрения зоны элементарного контакта [16]. Термодинамические силы являются входящими факторами уравнения регрессии. Планирование эксперимента проводилось на основе данных табл.3.

Отметим, что в эксперименте при замене материала меняется соответственно и химический потенциал изменяемого элемента трибосистемы, поэтому материалы обозначены символами μ_1, μ_2, μ_3 . Это связано с тем, что при замене смазочного материала меняется его химическая активность и соответственно химический потенциал. Для твердых материалов упрочнение представляет собой изменение химического потенциала вследствие роста плотности дислокаций. Поэтому варьирование всех четырех факторов ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$) есть варьирование $\Delta\mu$ различными способами. При неактивном смазочном материале градиент химического

потенциала возникает лишь в результате упрочнения металлических материалов, что при пластическом контакте ведет к ухудшению параметра оптимизации – росту f . С введением активного смазочного материала возникает градиент химического потенциала, который провоцирует избирательное растворение и хемомеханический эффект.

Анализ данных показывает, что комплексное влияние на коэффициент трения механохимических и хемомеханических факторов приводит к снижению величины f при повышении градиента химического потенциала до определенных пределов. Это нашло отражение и в регрессионном уравнении (4):

$$1000f = 27 + 9,2\gamma_1 + 9,6\gamma_2 - 20\gamma_3 + 10\gamma_4 + 10,6\gamma_1\gamma_2 - 10\gamma_1\gamma_3 + 11,6\gamma_1\gamma_4 - 12,5\gamma_2\gamma_3 + 11,8\gamma_2\gamma_4 - 12\gamma_3\gamma_4 + 10\gamma_2\gamma_4 - 11,2\gamma_1\gamma_2\gamma_3 - 11\gamma_1\gamma_3\gamma_4 - 11,7\gamma_2\gamma_3\gamma_4 - 11,2\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4 \quad (4)$$

В том случае, когда смазочный материал не обладает химической активностью, величина ($\Delta\mu_\Sigma$) полностью определяется деформационной составляющей. Если в этом варианте рассмотреть зависимость $f(\Delta\mu_\Sigma)$, считая, что градиент химического потенциала растет в зависимости от роста упрочнения, результатом будет монотонно возрастающая функция. При этом составляющими аргумента $\Delta\mu_\Sigma$ будут факторы γ_1 , γ_2 , и γ_4 из табл.1, и рост аргумента будет происходить по мере роста указанных факторов. Результат построения соответствующего графика представлен на рис.3 для области А.

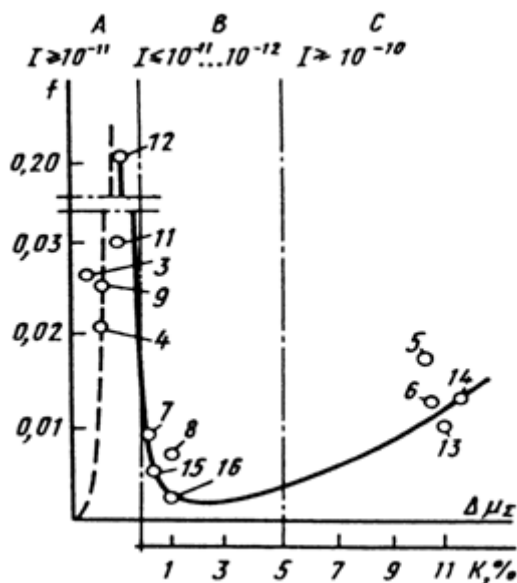


Рис.3. Совмещенная диаграмма зависимости коэффициента трения f от суммарного градиента химического потенциала $\Delta\mu_\Sigma$ трибосистемы и концентрации K (%) легирующего элемента в медном сплаве при смазывании глицерином: A – область механического изнашивания; B – область избирательного переноса; C – область коррозионно-механического изнашивания (номера точек на графике соответствуют номерам экспериментов)

Для построения полной зависимости $f(\Delta\mu_\Sigma)$ в областях В и С на рис. 3 можно воспользоваться тем же приемом, откладывая на оси абсцисс значения $\Delta\mu_\Sigma$, составленные аналогично значениям $\Delta\mu_\Sigma$ для области А из значений соответствующих входящих факторов

– концентрации легирующих элементов, пропорционально которой растет электродный потенциал, а значит и градиент суммарного химического потенциала.

В области В, где учитывается влияние активного смазочного материала, коэффициент трения снижается и подходит к минимуму. Однако дальнейший рост градиента химпотенциала, обусловленный выбором материалов с более высокой концентрацией легирующего элемента, приводит к увеличению роли химических процессов, что оказывает разрушающее действие на поверхностные слои и рост коэффициента трения, что и видно в области С на рис.3; происходит коррозионно-механическое изнашивание.

Основным результатом регрессионного анализа является оценка весомости входных факторов. Как следует из сопоставления значений регрессионных коэффициентов, наиболее весомым является фактор μ_3 – активность смазочного материала; его значение превышает в два раза значения всех остальных коэффициентов. Следует отметить, что полученное уравнение (4) является частным случаем представленного выше уравнения (1), которое с помощью методов неравновесной термодинамики описывает комплекс явлений, обобщенно названных физико-химической механикой трения, обусловленной активностью смазочного материала [17].

Важным итогом приведенных теоретических и экспериментальных исследований является определение концентрационной области используемых в триботехнике латуней, состав которых обеспечивает реализацию явления избирательного переноса при наличии активных составляющих в смазочном материале. Установлено, что для достижения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых латуней необходима гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в условиях контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений. Эта область, рис.3, ограничена для промышленных латуней, применяемых в триботехнике, примерно, пятью-восемью процентами.

Выводы.

1. Анализировали экспериментально полученную совокупность макроскопических критериев (показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (физическое уширение рентгеновских линий материала зоны контактной деформации, отражающей плотность дефектов дислокационной природы, характеристики механических свойств металла, а также период кристаллической решетки, указывающий на изменение элементного и фазового состава) при трении латуней, применяющихся в сопряжениях сталь – антифрикционный сплав в среде поверхностно-активных смазочных материалов. Показано, что реализация явления избирательного переноса, приводящая пару к практической безызносности, основана на формировании макроскопического диффузионного потока по глубине зоны контактной деформации, направленного к поверхности и имеющего положительный градиент параметра кристаллической решетки α -твердого раствора, сопровождающийся формированием пластифицированной пленки меди на поверхности трения.

2. Предложена математическая модель, описывающая роль механохимических и хемомеханических эффектов при трении медных сплавов в среде активного смазочного материала. Разработано регрессионное уравнение, в котором в качестве параметра оптимизации принят коэффициент трения пары медный сплав - сталь. Наиболее весомым фактором среди регрессионных коэффициентов, характеризующих давление в контакте, упрочняемость антифрикционного сплава и стали, является фактор активности смазочного материала. Его значение превышает в два раза значения остальных.

3. Установлено, что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых медных сплавов при трении в поверхностно-активной смазочной среде, предпочтительна гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в зоне контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений и формирования новых фаз. Эта область ограничена для промышленных сплавов, применяемых в триботехнике, как правило, пятью-восемью процентами.

Список литературы

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость конструкционных азотированных сталей и сплавов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 518 с.
2. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. - М.: Наука, 1981. - 127 с.
3. Куксенова Л.И., Поляков С.А. Формирование динамической структуры приповерхностных слоев материалов сопряжений скольжения в различных смазочных средах // МиТОМ. - 2019. - №11. - С.39-43.
4. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. - М.: Изд-во «Нобель Пресс», 2015. - 679 с.
5. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Механизмы деформации приповерхностных слоев металлов и возможность возникновения самоорганизации в этих процессах // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2006. - №4. - С.51-61.
6. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
7. Алексеев Н.М., Куксенова Л.И., Правдухина Е.М., Рыбакова Л.М., Шапиро А.М. Исследование фрикционного упрочнения поверхностных слоев меди в режиме граничного трения // Трение и износ. - 1982. - №1. - С.33 – 42.
8. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. - 1987. - № 4. - С.581-589.
9. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 384с.
10. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. -1994. - №3-4. - С.26-38.
11. Nakajima K., Isogai A. Elektron microprobe study of the effect of abrasion of the surface of alloy crustals // Wear. - 1967. - V.10, N2. - P.151-156.
12. Ferrante J., Buckley D.H. A review of surface segregation, adhesion and friction studies performed on copper-aluminium, copper-tin and iron-aluminuma lloys // Trans.ASLE. - 1972. - V.15, N1. - P.18-24.
13. Nakajima K., Ohgo K., Awano T. Formation of a built-up edge during cutting // Wear. - 1968. - V.11. N.3. P.369-375.
14. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей самолетов. - М.: Машиностроение, 1974. - 200с.
15. Поляков С.А., Поляков А.А. Обоснование метода подбора сочетаний триботехнических материалов при использовании избирательного переноса // Трение и износ. - 1983. - Т. 4, № 1. - С.121-131.

16. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. - М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2009. - 108с.
17. Ребиндер П.А. Влияние активных смазочных сред на деформирование сопряженных поверхностей трения. / В сб. О природе трения твердых тел. - Минск: 1971. - С. 8-18.

Дата поступления: 15 марта 2022 г.