

УДК 669.01:621.8.0316

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БРОНЗ ПРИ ТРЕНИИ В СРЕДЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Лидия Ивановна Куксенова

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова (ИМАШ РАН), Москва, РФ  
[lkukc@mail.ru](mailto:lkukc@mail.ru)

**Аннотация.** Представлены характеристики структурного состояния зоны контактной деформации при трении алюминиевых и оловянных бронз по стали в среде поверхностно-активных смазочных материалов. Установлено, что минимальные потери на трение и износ достигаются за счет гомогенной структуры  $\alpha$ -твердого раствора бронз и соответствующего концентрационного интервала растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющего развитие макроскопического диффузионного потока в зоне контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений. Среди промышленных алюминиевых бронз наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных смазочных средах обладают бронзы типа БрА5, БрА7; среди оловянных бронз – БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15.

**Ключевые слова:** бронзы, структура, контактная деформация, трение, износ, поверхностно-активные смазочные материалы, явление избирательного переноса.

## WEAR RESISTANCE OF BRONZES UNDER FRICTION IN SURFACE-ACTIVE LUBRICANTS

© L.I. Kuksenova

Blagonravov Institute of Machine Science (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation  
[lkukc@mail.ru](mailto:lkukc@mail.ru)

**Abstract.** The characteristics of the structural state of the contact deformation zone during friction of aluminum and tin bronzes on steel in the medium of surface-active lubricants are presented. It has been established that the minimum friction and wear losses are achieved due to the homogeneous structure of the  $\alpha$ -solid solution of bronzes and the corresponding concentration range of the solubility of the alloying element in the solid state, which allows the development of a macroscopic diffusion flow in the contact deformation zone without the implementation of local diffusion phenomena. Among industrial aluminum bronzes, bronzes of the BrA5, BrA7 types have the highest wear resistance in surface-active lubricating media; among tin bronzes - BrOF4-0.25, BrOF6.5-0.15.

**Key words:** .

**Введение.** Процесс совершенствования узлов трения машин и механизмов сопровождается, как правило, повышением уровня нагрузок, скоростей взаимного перемещения сопряжений, применением новых смазочных материалов, новых технологий обработки контактирующих подвижных поверхностей при соблюдении требований по их надежности, безопасности и

долговечности. Известно, что даже небольшое увеличение износостойкости материалов пар трения приводит к значительной экономии конструкционных материалов, уменьшению затрат на ремонт и производство запасных частей. Поэтому обоснованный выбор материалов триботехнического назначения и создание совершенных узлов трения относятся к наиболее важным и актуальным задачам при проектировании машины. Сформулировано множество рекомендаций, позволяющих минимизировать потери на трение и износ в условиях эксплуатации сопряжений [1]. Отмечается, что разработка узла трения должна не только базироваться на основных принципах создания машины в целом при соблюдении требуемых технико-экономических и эксплуатационных показателей, но и на учете конструктивных методов обеспечения работоспособности узлов трения, среди которых в первую очередь следует отметить разработку схемы узлов трения с позиций ее влияния на работоспособность и организацию систем смазки и защиты от внешних воздействий и эксплуатационных перегрузок, выбор конструкционных и смазочных материалов.

К наиболее трудным задачам относится выбор конструкционных материалов триботехнического назначения. Связано это с тем, что в зоне контактного взаимодействия происходят деформационные и физико-химические процессы, которые приводят к изменению структуры, фазового состава и, следовательно, структурно-чувствительных свойств материала поверхностного слоя. Фактически при каждом акте контактного взаимодействия деформации подвергается материал с другим комплексом свойств.

Основная задача при выборе материала триботехнического назначения состоит в том, чтобы на основе знаний и опыта фрикционного материаловедения выбрать сочетание конструкционных и смазочных материалов, соответствующее требованиям ресурса узла трения. Выбор сочетания материалов проводят с учетом основных положений триботехники, среди которых: законы динамики изнашивания (при этом учитывается, что каждой конструкции сопряжения и условиям его работы соответствует определенный закон динамики изнашивания); правило положительного градиента механических свойств (при этом следует иметь в виду, что при наличии градиента механических свойств внешнее трение реализуется только при определенных значениях отношения глубины внедрения к радиусу микронеровностей  $h/r$ , касательного напряжения  $\tau_0$  и предела текучести деформируемого материала  $\sigma_T$ :  $h/r \leq 0,5(1-2\tau_0)/\sigma_T$ , т.е. для каждой пары материалов существует определенный диапазон внешних условий трения, в котором возможно их использование); правило величины износа применительно к прямым и обратным парам [1]; тип структуры конструкционного материала, обеспечивающей высокую износостойкость [2]; совместимость материалов [3]. Следует отметить, что в настоящее время ведутся интенсивные разработки по созданию баз трибологических данных материалов триботехнического назначения, работающих в разных условиях [4].

Применение меди и медных сплавов в качестве антифрикционных материалов постоянно увеличивается, 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) [5].

В [6] описаны характеристики структурного состояния зоны контактной деформации при трении латуней в среде активных смазочных материалов. Показано, 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, сопровождающегося избирательным 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 совокупность структурных превращений в зоне деформации и реализацию явления избирательного переноса.

**Данная работа** посвящена анализу экспериментальных результатов исследования структурных изменений и триботехнических свойств распространенных алюминиевых и оловянных бронз с позиций влияния количества легирующих элементов на работоспособность пары трения медный сплав – сталь в условиях трения скольжения в поверхностно-активной смазочной среде с целью обобщения методологических основ выбора составов медных сплавов триботехнического назначения для реальных условий эксплуатации.

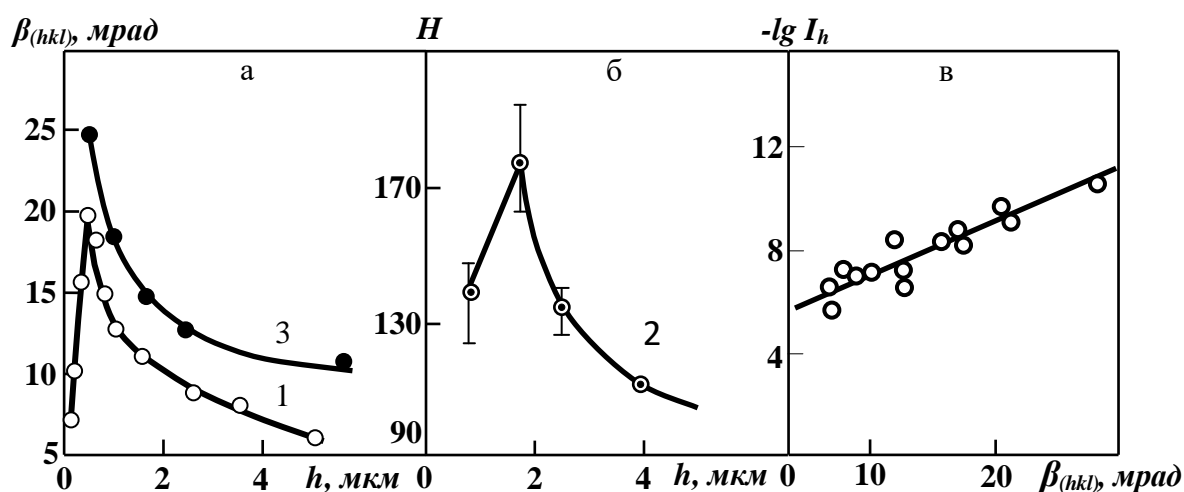
**Материалы и методики исследования.** В качестве объекта исследования была выбрана пара реверсивного трения скольжения бронза – сталь в поверхностно-активной смазочной среде. Испытания проводили на машине трения МТ-1 с возвратно-поступательным движением плоских поверхностей с относительной скоростью 0,19 м/с и давлением 10 МПа. 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 влияние среды и количества легирующих элементов в медном сплаве на работоспособность сопряжения. Выбор антифрикционных сплавов основывался на особенностях кривой растворимости легирующего элемента в меди в твердом состоянии. Исследуемые сплавы системы Cu-Al – бронзы БрА5, БрА7, БрАМц9-2, БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖН10-4-4 и сплавы системы Cu-Sn – бронзы БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15, БрОФ10-1, БрО12, БрОЦ8-4, БрОСН10-2-3, БрОЦС5-5-5, БрОС10-10, БрОС5-25. Эти группы бронз отличаются типом температурной зависимости основного легирующего элемента в меди (концентрационной областью  $\alpha$ -твердого раствора: узкой (до ~ 9% Al) и ограниченной (менее 1% Sn) в равновесном состоянии).

Для анализа особенностей изменения структуры поверхностных слоев пары трения с позиций фрикционного материаловедения использовали экспериментально полученную совокупность макроскопических критериев (показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (физическое уширение рентгеновских линий материала зоны контактной деформации и период кристаллической решетки) [7].

**Результаты и их обсуждение.** Известно, что поверхностно-активная среда может оказывать на реологическое поведение материала пластифицирующее и упрочняющее влияние. Пластифицирующее действие проявляется в снижении макроскопического предела текучести, уменьшении коэффициента упрочнения, в увеличении скорости деформации при испытаниях на ползучесть. Упрочняющее действие среды обусловлено уменьшением подвижности приповерхностных дислокаций в результате их адсорбционной блокировки, тормозящего действия оксидных и пассивирующих пленок и электрохимических явлений на поверхности твердых тел [8].

На рис.1 приведена совокупность структурных (а), механических (б) и износных данных (в) для пары трения медь – сталь в смазочных средах, в которых образуются поверхностно-активные вещества в процессе трения (глицерин), в минеральном масле с пакетом присадок и в вазелиновом масле, в состав которого до испытаний введены ПАВ разного состава. Как

видно из сравнения кривых 1 и 3, рис.1а, при трении в минеральном масле с присадками (кривая 3) в зоне контактной деформации при приближении к поверхности происходит увеличение физического уширения рентгеновских линий  $\beta_{(hkl)}$  и, следовательно, плотности дислокаций ( $\rho = A\beta_{(hkl)}^2$ , где  $\rho$  – плотность дислокаций), что вызывает упрочняющий эффект и накопление усталостных повреждений с увеличением пути трения. При наличии в смазочной среде ПАВ (кривая 1) в поверхностном слое  $\beta_{(hkl)}$  резко падает, свидетельствуя о снижении плотности дислокаций в нем; при этом уменьшается его твердость (кривая 2, рис.1б). Следовательно, есть основания говорить о создании условий для повышения деформационной способности материала зоны контактной деформации, а сам процесс формирования слоя с повышенной пластичностью локализуется в тонкопленочном объекте размером порядка 0,5 мкм. Эффект влияния ПАВ (эффект пластифицирования) находит выражение в повышении износостойкости металла; уровень поверхностного разрушения зависит от степени поверхностной активности используемых в эксперименте ПАВ (рис.1в, кривая 4).

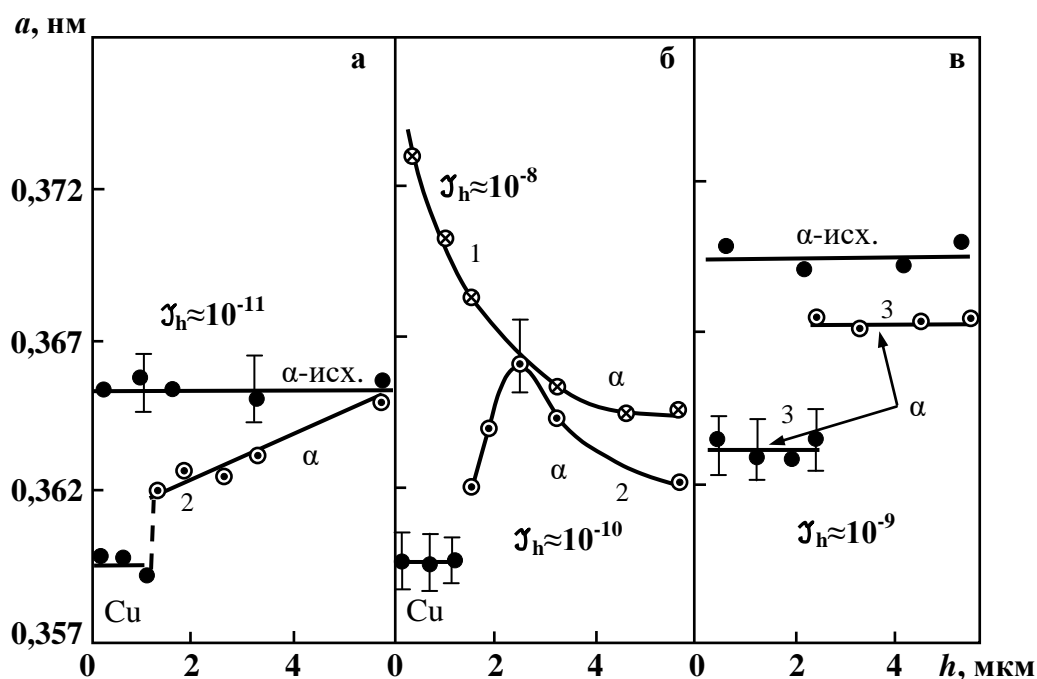


**Рис.1.** Структурные и механические характеристики зоны деформации меди при трении в среде глицерина (1а, 2б); в минеральном масле (3а); в вазелиновом масле с присадками ПАВ:  $\beta$  – физическое уширение рентгеновских линий;  $H$  – микротвердость;  $I_h$  – интенсивность изнашивания;  $h$  – глубина зоны деформации.

Рассмотрим бронзы, созданные на основе диаграммы состояния Cu-Al. Проанализируем основные закономерности изменения структурного состояния зоны контактной деформации при трении пары бронза – сталь в разных смазочных средах.

На рис.2 приведены характеристики фазового состава сплавов зоны деформации бронз при трении в рабочей жидкости систем гидравлики на основе глицерина, которая является поверхностно-активной средой (ПАВ) по отношению к алюминиевым бронзам, в индустриальном масле, а также в среде ЦИАТИМ-201, которая содержит поверхностно-активные и антиокислительные присадки; кроме того, приведены соответствующие интенсивности изнашивания при давлении 10 МПа. В исходном состоянии основной структурной составляющей бронз является  $\alpha$ -твердый раствор Cu-Al (период кристаллической решетки которого постоянен по глубине поверхностного слоя, а его значение определяется количеством растворенных легирующих элементов). После трения

поверхностный превращается в двухфазный композиционный материал, характерный для явления избирательного переноса.



**Рис.2.** Изменение периода кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора алюминиевых бронз по глубине зоны деформации при трении в разных смазочных средах: *a* – БрА5(БрА7); *б* – БрАМц9-2; *в* – БрАЖН10-4-4(БрАЖМц10-3-1,5); 1 – индустриальное масло; 2 – жидкость на основе глицерина; 3 – ЦИАТИМ-201

С помощью рентгеноструктурного анализа выявлены особенности структуры зоны контактной деформации алюминиевых бронз в зависимости от их элементного состава; основное внимание уделялось роли концентрации алюминия:

- бронза БрА5, рис.2*a*. Состав сплава характеризуется положительным градиентом параметра решетки по глубине зоны деформации при трении в среде на основе глицерина, который обусловлен обеднением поверхностного слоя алюминием под влиянием сжимающих остаточных напряжений первого рода в пластифицированном приповерхностном микрообъеме. На поверхности образцов пары трения в результате избирательного растворения формируется пластифицированная медная пленка. В подповерхностных слоях более 4 мкм происходит постепенное увеличение алюминия до значения, характерного для исходного состояния; такое структурное состояние обеспечивает стабильный режим избирательного переноса, интенсивность изнашивания достигает предельно высоких значений ( $\sim 10^{-11}$ ).

- Бронза БрАМц9-2. На рис.2*б* приведены две кривые: 1 – для случая трения бронзы в среде минерального масла с пакетом присадок и 2 – в среде на основе глицерина. При трении в среде глицерина создается пластифицированная пленка чистой меди. Рентгеновский и Оже-спектроскопический анализы показывают, что положительный градиент периода кристаллической решетки бронзы обусловлен обеднением подповерхностного слоя глубиной менее 2 мкм атомами легирующих элементов. Омеднение происходит также под влиянием сжимающих остаточных напряжений 1 рода в пластифицированном приповерхностном

микрообъеме [8]. Во внутриобъемном, не пластифицированном слое более 2 мкм, действуют растягивающие остаточные напряжения [8]. В результате эта зона обогащается атомами алюминия, частично продифундирующими из поверхностного пластифицированного слоя. В макромасштабе этот случай также соответствует режиму избирательного переноса. Однако износ оказывается выше ( $\sim 10^{-10}$ ) по сравнению с бронзой БрА5. Связано это с тем, что в бронзе БрАМц9-2 присутствует 2% марганца, который является сильным раскислителем, поэтому может образовывать на поверхности пассивирующую оксидную пленку. В результате протекают два конкурирующих процесса: формирование направленного к поверхности диффузионного потока элементов (создание условий формирования медной пленки) и их торможение (создание условий для ее разрушения). Кривая изменения периода решетки (величина которого определяется в основном концентрацией алюминия, т.к. атомные объемы марганца и меди близки) на глубине  $\sim 2$  мкм имеет максимум, указывающий на формирование концентрационной неоднородности на глубине  $\sim 2,5$  мкм подповерхностной зоны. Поэтому бронза БрАМц9-2 в силу положения вблизи кривой, ограничивающей  $\alpha$ -твердый раствор, склонна к формированию новых фаз ( $\alpha_2$ ,  $\gamma$ ), которые, как можно полагать по результатам испытаний на износ, способствуют разрушению образующейся медной пленки; процессы образования пленки и ее локального разрушения чередуются, и в макромасштабе это приводит к нестабильности режима высокой износостойкости.

При трении в минеральном масле картина структурных изменений другая. Марганец, оказываясь на межфазных границах и являясь сильным раскислителем, способствует образованию на поверхности бронзового образца плотной пассивирующей оксидной пленки. В этих условиях слой под оксидной пленкой оказывается более упрочненным, чем подповерхностная внутриобъемная зона. В результате механического воздействия при трении в приповерхностном микрообъеме возникают растягивающие напряжения [8], приводящие к увеличению концентрации алюминия в нем (параметр решетки увеличивается, кривая 1, рис.2б). В макромасштабе эти процессы приводят к повышенному износу пары трения.

- Бронза БрАЖМц10-3-1,5 (рис.2в) при трении в среде ЦИАТИМ-201, которая содержит пластифицирующие ПАВ и антиокислительные присадки, препятствующие образованию на поверхности упрочняющих оксидных пленок. Концентрация алюминия в бронзе соответствует положению за кривой, ограничивающей  $\alpha$ -твердый раствор, поэтому бронза является гетерогенной. Наиболее типичная картина структурных составляющих в зоне деформации при трении в среде с ПАВ представляется двумя изоструктурными  $\alpha$ -твердыми растворами с ГЦК-решеткой, с разной концентрацией легирующих элементов в них и периодами решетки 0,363 нм и 0,366 нм рис.2в, кривая 3 (по данным микроспектрального анализа концентрация Al составляет 4%, Mn – 0,6% и Al-7,5%, Mn-0,7%, Fe-2% соответственно). Слой с более высокой концентрацией меди преимущественно расположен в слое, прилегающем к свободной поверхности. Заметим, что аналогичная картина наблюдается и для бронз БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4. Положительный градиент параметра решетки бронзы также обусловлен обеднением деформированного слоя легирующими элементами, что создает предпосылки для повышения износостойкости бронзы; однако, на сопряженную стальную поверхность переносится сплав, в большей степени обогащенный медью, характеристики которого соответствуют вторичной структуре на поверхности образца из медного сплава. Основываясь на структурных критериях [9], можно заключить, что этот случай не соответствует в полной мере явлению избирательного переноса: создаются только его структурные предпосылки, поэтому износ бронзы оказывается существенно выше. Как показали экспериментальные исследования, для реализации эффекта максимальной износостойкости сложнолегированных бронз необходимо увеличение внешнего давления или активности смазочной среды, приводящих к активизации процесса обеднения  $\alpha$ -твердого

раствора, непосредственно прилегающего к свободной поверхности, и формирование пластифицированной пленки меди [10].

Следовательно, в установившемся режиме трения в среде с ПАВ, когда основной процесс контактной деформации локализуется в поверхностной пленке, а в подповерхностных слоях идет диффузионный процесс перераспределения легирующего состава, особое значение для работоспособности материала приобретают структурные превращения, соответствующие диаграмме состояния Cu-Al. Вероятность реализации явления избирательного переноса (практической безызносности) тем выше, износ тем ниже, чем ниже концентрация основного легирующего элемента (алюминия) в области  $\alpha$ -твердого раствора.

Полученные выводы были подтверждены в практике конструирования и эксплуатации реальных узлов тяжело нагруженных шарнирно-болтовых соединений. Важным компонентом таких узлов являются конструкционные и смазочные материалы, специально разработанные для достижения максимального эксплуатационного эффекта. Решалась задача повышения несущей способности и долговечности тяжело нагруженных соединений, которые изготавливаются из высоколегированных алюминиевых бронз БрАЖМц10-3-1,5 и БрАЖН10-4-4 в смазочных средах ЦИАТИМ-201, Свинцоль-01 и Атланта, применяющихся в указанных реальных узлах. Результаты лабораторных и стендовых испытаний, приближенных к условиям эксплуатации [10], показали преимущество смазочной композиции Атланта: при близких значениях коэффициента трения, изменяющихся в зависимости от пути трения в диапазоне величин 0,05–0,19, пара трения в смазке Атланта в 10–20 раз имеет более низкий износ, при этом путь трения в условиях допустимого режима составляет в среде ЦИАТИМ-201 – 13 м; в среде Свинцоль-01 – 70 м; в среде Атланта – 150 м. Эффективность смазочного материала Атланта обусловлена использованием в его составе комплекса присадок универсального действия, включающих жирные кислоты и их соли, приводящие к избирательному растворению легирующих элементов и образованию гомогенного обогащенного медью слоя на поверхности тяжело нагруженного контакта.

Для решения задачи о рациональном составе медного сплава проводили оценку долговечности тяжело нагруженных шарнирно-болтовых соединений в смазке Атланта по данным испытаний на специальном стенде [10] при давлении 120 МПа. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

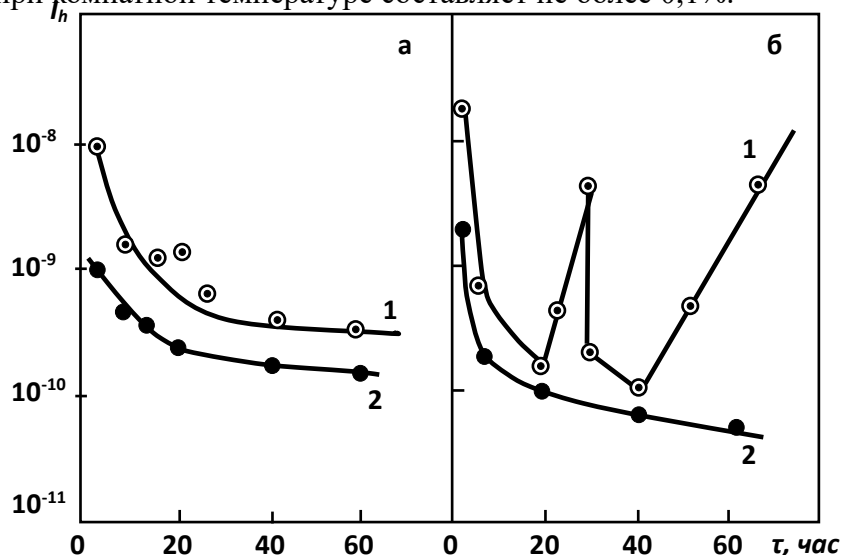
## Эксплуатационные характеристики алюминиевых бронз

Бронза	Интенсивность изнашивания, $10^7$	Предельный путь трения, м	Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup> [11]	Относительное удлинение, % [11]	Твердость НВ [11]
БрАЖН 10-4-4	4,1	14,6	77	10	180-225
БрАЖМц 10-3-1,5	6,2	3,9	60	20	120-140
БрА5	1,3	223,5	38-80	65	65-200

Из приведенных данных следует, что из испытанных бронз БрА5, представляющая собой гомогенный  $\alpha$ -твердый раствор с наименьшим содержанием алюминия, более низким значением предела прочности и большим относительным удлинением (БрА5) при трении в поверхностно-активной среде и давлении 120 МПа достигает интенсивность изнашивания в

3–5 раз ниже, а предельный путь трения увеличивается в 15–55 раз по сравнению с более прочными гетерогенными бронзами БрАЖН10-4-4 и БрАЖМц10-3-1,5, табл. 1.

На основании представленных данных сделан вывод, что при выборе алюминиевых бронз в качестве антифрикционного материала тяжело нагруженных шарнирно-болтовых соединений, эксплуатация которых происходит в среде с поверхностно-активными составляющими смазочного материала, длительная работоспособность обеспечивается однофазным сплавом с большим запасом пластичности. Наиболее перспективной в этом случае проявила себя однофазная бронза с 5–7% Al. Этот результат подтверждается выводами, сформулированными выше – о необходимости минимизации концентрации легирующего элемента в антифрикционном сплаве с целью реализации наиболее высокой износостойкости, которая в данном случае обеспечивается сочетанием бронз БрА5, БрА7 и смазки Атланта. Это заключение тем более важно для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии, к которым относятся оловянные бронзы. В промышленных бронзах концентрация олова в  $\alpha$ -твердого раствора в результате термической обработки может достигать чуть более 6%; растворимость олова в меди в равновесном состоянии при комнатной температуре составляет не более 0,1%.



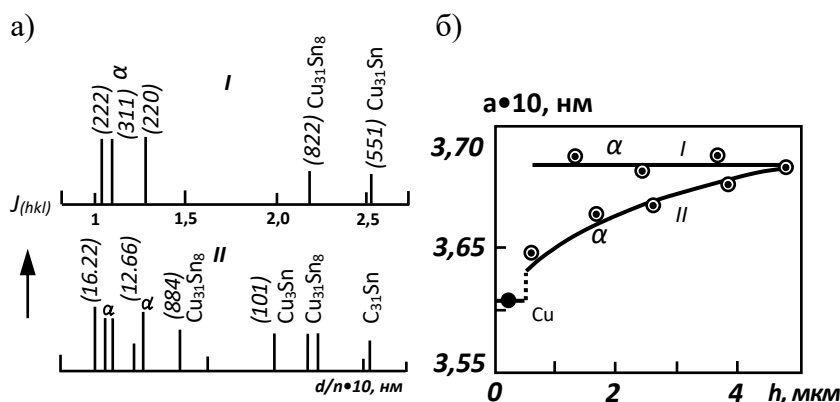
**Рис.3.** Изменение интенсивности изнашивания оловянных бронз в зависимости от времени испытаний в разных смазочных средах: *а* – индустриальное масло; *б* – жидкость на основе глицерина; 1 – БрОФ10-1(БрО12); 2 – БрОФ4-0,25(БрОФ6,5-0,15)

Прочностные характеристики бронз тем выше, чем выше концентрация олова в сплаве. В практике при выборе бронзы для узла трения руководствуются чаще всего именно значением прочностных характеристик. Однако это положение, как показали приведенные выше данные, справедливо только для неактивных смазочных материалов.

На рис.3 показана зависимость интенсивности изнашивания бронз с разным содержанием олова от пути трения. При испытании в индустриальном масле для бронз разного состава наблюдается монотонное уменьшение износа в функции времени, достигающее в установившемся режиме трения  $\sim 3 \cdot 10^{-10}$ . При трении в жидкости на основе глицерина, содержащей ПАВ, качественно и количественно меняется картина изнашивания. Высоколегированная бронза БрОФ10-1 (кривая 1) проявляет явно выраженный скачкообразный характер изнашивания; установившийся режим трения не достигается, что недопустимо для узлов трения в условиях реальной эксплуатации. Экспериментальное



исследование показало, что качественно аналогичный характер изнашивания наблюдается и для высоколегированных многофазных бронз БрО12, БрОСН10-2-3, БрОС10-10. Бронза БрОФ4-0,25, а также БрОФ6,5-0,15 в которых содержание олова существенно меньше, в среде с ПАВ проявляет типичный для режима граничного трения характер изнашивания; интенсивность износа достигает величины  $\sim 10^{-10}$  в установившемся режиме трения (рис.3б, кривая 2). Так же, как в латунях и алюминиевых бронзах, при трении в поверхностно-активных средах износ тем ниже, чем ниже концентрация основного легирующего элемента в сплаве; это дает основание полагать, что комплекс механохимических и хемомеханических процессов в зоне контактной деформации также связан с процессом диффузионного перераспределения олова в поверхностных микрообъемах сплавов.



**Рис.4.** Штрих-диаграммы металлических фаз бронзы БрОФ10-1 (а) и изменение периода кристаллической решетки по глубине зоны деформации бронзы БрОФ4- 0,25 (б) при трении в жидкости на основе глицерина: I – исходное состояние; II – после трения

На рис.4 приведены характеристики изменения фазового состава оловянных бронз при трении в активной смазочной среде. Для высокооловянистой бронзы БрОФ10-1 (Бр012), (рис.4а), особенность состоит в том, что в зоне контактной деформации наблюдается увеличение количества фазы  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  (увеличивается количество рефлексов на рентгенограмме) и появление  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (II, рис.4а). Следовательно, в поверхностном слое реализуются два процесса: 1 - формирование направленного к поверхности эффективного диффузионного потока олова, его растворение в активной смазочной среде и создание условий для образования пластифицированной пленки меди (рис.4б); 2 – реализация локальных диффузионных процессов в неравновесной металлической системе с выделением новых фаз на основе Cu-Sn (рис.4а), что приводит к подавлению процесса формирования пленки меди. Поэтому пара трения не достигает установившегося режима, средний износ высокий. Следует особо подчеркнуть, что при трении в неактивной среде подобных явлений не происходит, поэтому наблюдаются три стадии процесса изнашивания – приработка, установившийся режим и переход в режим повреждаемости, рис.3а, кривая 1.

С понижением концентрации олова в сплаве (бронза БрОФ4-0,25, а также БрОФ6,5-0,15) в тонких поверхностных слоях происходит обеднение  $\alpha$ -твердого раствора и формирование структуры, характерной для достижения высокой износостойкости. На поверхности, рис.4б, так же как и в сплавах Cu-Zn, Cu-Al, формируется гомогенная структура (пластичная медная пленка), которая обеспечивает высокую работоспособность сопряжения.

Для узлов трения широко применяются многофазные оловянисто-свинцовистые бронзы БрОЦС5-5-5, БрОС10-10, БрОС5-25 и др. Свинец, будучи мягкой структурной составляющей, при трении выходит на поверхность и препятствует формированию более триботехнически эффективной, пластифицированной медной пленки, поэтому износ этих бронз в поверхностно-активных средах не превышает  $10^{-8} - 10^{-9}$ , что сравнимо с износом в минеральных маслах. Присутствие 4% Zn в бронзе БрОЦ8-4, способствующего расширению концентрационного диапазона  $\alpha$ -твердого раствора, оказывает благоприятное влияние на диффузионные процессы в зоне контакта и приводит к повышению работоспособности оловянно-цинковой бронзы в среде с ПАВ [12].

Следовательно, среди оловянных бронз наибольшую износостойкостью при трении в среде, содержащей ПАВ, имеют бронзы, основной структурной составляющей которых является  $\alpha$ -твердый раствор, состав которого должен исключать реализацию локальных диффузионных процессов, приводящих к выделению новых структурных составляющих в условиях формирования эффективного макроскопического диффузионного потока по всей зоне контактной деформации. Среди промышленных бронз триботехнического назначения этому требованию в большей мере отвечают бронзы типа БрОФ6,5-0,15 и БрОФ4-0,25.

**Заключение.** Рассмотренная совокупность макроскопических и микроскопических критериев качества нагруженного сопряжения бронза – сталь при трении скольжения в среде поверхностно-активных смазочных материалов, полученная экспериментально, показывает, что для обеспечения высокой износостойкости медного сплава и работоспособности сопряжения определяющим фактором является пластичность поверхностного слоя. Наибольший ресурс пары в смазочной среде с ПАВ достигается в результате роста износостойкости медного сплава при относительном снижении твердости и повышении пластичности антифрикционного сплава за счет формирующейся при контактной деформации пластифицированной медной пленки. При этом снижение твердости, обусловленное пластифицирующим действием поверхностно-активных веществ, происходит только в поверхностной пленке меди; во внутриобъемной зоне, не пластифицированной действием смазочной среды, твердость остается на требуемом уровне.

Триботехнические испытания и структурные исследования зоны контактной деформации бронз (алюминиевых – БрА5, БрА7, БрАМц9-2, БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖН10-4-4-4, БрАЖ9-4; оловянных – БрОФ-0,25, БрОФ6,5-0,15, БрОФ10-1, БрО12, БрОЦ8-4, БрОЦС5-5-5, БрОС10-10, БрОС5-25) показали, что в условиях пластифицирующего действия смазочной среды происходит формирование макроскопического диффузионного потока легирующих элементов, направленного к поверхности контакта и сопровождающегося их растворением в смазочной среде с последующим созданием дополнительных ПАВ и пластифицированной однофазной пленки меди. Указанная совокупность структурных превращений обуславливает повышение износостойкости бронз и соответственно увеличение ресурса сопряжения.

Установлено, что предельно низкие потери на трение и износ традиционно используемых алюминиевых и оловянных бронз обеспечивает гомогенная структура  $\alpha$ -твердого раствора и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в зоне контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений. Среди промышленных алюминиевых бронз наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных смазочных средах обладают бронзы типа БрА5, БрА7; среди оловянных бронз – БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15.

#### Список литературы

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация). - М.: Изд-во МСХА, 2000. - 632с.
2. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. - Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1996. - 50с.
3. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. - М.: Наука, 1981. - 127 с.
4. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. - 237с.
5. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 384с.
6. Куксенова Л.И., Поляков С.А. Методологические основы выбора состава латуней для узлов трения скольжения в среде поверхностно-активных смазочных материалов//ВНТР. - 2022. - №164. - С. 10 – 22.
7. 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.
8. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. - 1994. - №3-4. - С.26-38.
9. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media. Proc. The Conference on Tribology «Friction, Lubrication and Wear – 50 years on». – London: IME, July 87. P. 419-426.
10. Куксенова Л.И., Дякин С.И., Титов В.В., Громаковский С.Д., Вячеславова Л.А., Рыбакова Л.М. Влияние структурных изменений и свойств поверхностных слоев материалов на несущую способность и долговечность шарнирно-болтовых соединений // Трение и износ. - 1988. - Т.9, № 3. - С. 422-423.
11. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник. - М.: Металлургия, 1974. - 488с.
12. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.

*Дата поступления: 6 октября 2022 г.*