

В.М.Юров, Н.Х.Ибраев, С.А.Гученко

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

**ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

*Мақалада үйкеліс коэффициенті мен беттік керілудің байланысы қарастырылды. Металл-металл жұбы үшін үйкеліс коэффициенті есептелді. Тұну қабатының беттік керілуін анықтайтын тәсіл ұсынылды.*

*Properties of a surface of firm bodies and coverings, as well as thin films, are defined, first of all, by their superficial energy or a superficial tension. The friction concerns the important properties of a surface. The friction represents difficult process which depends on a considerable quantity of factors. However even simple qualitative models can help with a choice of constructional materials for friction knots. In work communication of factor of a friction with a superficial tension is considered. Factors of a friction for pairs metal-metal are calculated. The method of definition of a superficial tension of besieged coverings is offered.*

*Введение*

Поверхностные явления имеют место в любой гетерогенной системе, состоящей из двух или нескольких фаз. По существу, весь материальный мир гетерогенен. Как гомогенные можно рассматривать системы лишь в ограниченных объёмах пространства. Поэтому роль поверхностных явлений в природных и технологических процессах чрезвычайно велика.

Для техники важны такие поверхностные явления, как смазочное трение и износ, контактные взаимодействия, структурные изменения в композиционных материалах, а также электрические и электрохимические процессы и явления на поверхностях твёрдых тел.

Свойства покрытий (механические, триботехнические и т.д.), как и тонких пленок, определяются, в первую очередь, их поверхностной энергией  $\omega$  или поверхностным натяжением  $\sigma$ . В случае жидкостей эти две величины совпадают, а в случае твердых тел связаны уравнением Шаттльворта и Херинга [1]:

$$\sigma = \omega + \Omega \left( \frac{\partial \omega}{\partial \Omega} \right)_T, \quad (1)$$

где  $\Omega$  — площадь поверхности твердого тела.

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [1]. Недавно нами были предложены методы экспериментального определения поверхностного натяжения твердых диэлектриков и магнитных материалов [2–4]. Для осаждаемых покрытий (гальванических, газотермических, ионно-плазменных и т.д.) такого метода нет, и он будет предложен в настоящей работе.

*Трение и износ деталей машин*

При решении машиностроительных задач руководствуются следующими тремя законами трения, установленными еще Г.Амонтоном и Ш.О.Кулоном:

- сила трения пропорциональна нормальной нагрузке;
- сила трения не зависит от формы и размера номинальной площади контакта;
- сила трения не зависит от скорости скольжения.

В современной интерпретации следует иметь в виду, что скорость существенно влияет на фрикционный разогрев, а последний — на трибологические характеристики подвижных сопряжений.

Общепринятыми теориями трения являются адгезионно-деформационная теория Боудена-Тейбора и молекулярно-механическая теория трения, предложенная И.В.Крагельским [5]. В основе этих теорий лежит представление о сближении двух шероховатых поверхностей при контактном взаимодействии. Даже при очень малой нагрузке вследствие дискретности контакта давление на неровность очень велико. В результате деформирования материалов контактирующих тел поверхности контакта начинают сближаться, приводя в контакт все большее число неровностей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока площадь контакта не станет достаточной, чтобы нести нагрузку. При фрикционном взаимодействии для расчета при сосредоточенной нагрузке полупространства существует ряд

формул для точечного контакта (задача Буссинеска), для линейного контакта (задача Фламана), для распределенной нагрузки полупространства (комбинация этих задач). Оцениваются параметры контакта упругого герцевского, сферических и цилиндрических тел, пластического, а также упругопластического.

Модель Дерягина–Муллера–Токарева (ДМТ) рассматривает влияние упругих контактных деформаций на адгезию только для герцевского контакта. Равновесие достигается, когда деформация такова, что упругая реакция (сила упругого восстановления сферы, контактирующей с жестким полупространством) уравнивает совместное действие приложенной внешней нагрузки и сил молекулярного притяжения. В модели Джонсона–Кендалла–Робертса (ДКР) взаимодействие упругой сферы и жесткого полупространства ограничено только пределами площадки контакта. Для ее реализации используются расчетные давления по Герцу и Буссинеску. Модели ДМТ и ДКР располагаются на разных концах диапазона отношений упругой деформации к радиусу действия сил адгезии.

Модель Демкина, предназначенная для расчета фактической площади контакта, предусматривает введение эквивалентной шероховатой поверхности (ЭШП), контактирующей с идеально гладкой. ЭШП представляет комбинацию шероховатостей обеих соприкасающихся поверхностей. В результате получают основные соотношения для единичного пятна контакта и фактической площади для упругого и пластического контакта.

В модели Гринвуда–Вильямсона в дополнение к предыдущей модели активно используются методы теории вероятности (распределения Раиса, Релея, Гаусса) для расчета контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Согласно этой модели пластическое течение отдельной неровности начинается тогда, когда максимальное герцевское давление  $p_{\max}$  достигает  $0,6H$  ( $H$  — твердость наиболее мягкого из контактирующих материалов). При этом доля фактической площади касания  $\epsilon$ , приходящейся на эти неровности, должна превысить  $\epsilon \geq 0,02$ .

Индекс пластичности  $\psi$  позволяет рассчитать критическую номинальную нагрузку, при которой происходит переход от упругого контакта к пластическому —  $\psi = \frac{E}{H} \sqrt{\frac{\delta}{R}}$ .

В эту формулу наряду с модулем упругости  $E$  входит радиус закругления единичной неровности  $R$ . Исследованием этого параметра применительно к различным видам механической обработки занимался Э.В.Рыжов [6].

Для реальных поверхностей  $\psi$  изменяется от 0,1 до 100, при этом упругий контакт имеет место для  $\psi < 0,6$ , пластический — для  $\psi > 1,0$ , независимо от нагрузки [7].

#### *Выбор конструкционных материалов деталей узлов трения*

Выбор конструкционных материалов деталей узлов трения при стремлении к высоким эксплуатационным характеристикам рассматривается трибоматериаловедением и представляет собой одну из базовых проблем трибологии [5–16].

Основными задачами трибоматериаловедения являются отбор известных и создание новых материалов, обладающих оптимальными для данного узла трения характеристиками, обеспечивающими необходимый ресурс. При этом, помимо достижения необходимых эксплуатационных свойств, требуется учитывать экономические соображения исходя из рыночных условий. Поэтому трибоматериаловедение обычно решает компромиссные задачи целесообразного соотношения между уровнем эксплуатационных характеристик и себестоимостью.

В связи с этим важно, чтобы материалы узлов трения создавались из доступных недефицитных компонентов с использованием технологий, не требующих нестандартного оборудования, высокого вакуума, криогенных температур и дорогостоящих мероприятий.

Все материалы узлов трения можно разделить на две группы: антифрикционные и фрикционные. Первые применяются при создании подвижных соединений с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д. Фрикционные применяются в тормозах, фрикционных передачах и муфтах. Они должны обладать не только высоким и стабильным коэффициентом трения, но и высокой износостойкостью.

При выборе материалов узлов трения должна учитываться их совместимость, в особенности использование схватывания и последующего задира, что связано с химическим сродством, близостью строения и значений параметров кристаллических решеток. В более общей форме под совместимостью понимают способность материалов обеспечивать оптимальные параметры узла трения при

длительной эксплуатации, быстро приспосабливаться к резким изменениям нагрузки, скорости и температуры при неблагоприятных условиях смазки.

Процесс приработки должен заканчиваться образованием на поверхностях трения тонких слоев вторичных структур, предохраняющих материал от схватывания и задиrow, а также равновесной шероховатости, необходимой для обеспечения стабильного значения коэффициента трения.

В этой области наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования. В настоящее время применяют прямые и косвенные методы оценки совместимости материалов узлов трения. В обоих случаях сначала проверяется, не обладают ли материалы химическим сродством — совместимостью кристаллических решеток. При прямых методах проводятся испытания материала на машинах трения с целью определения критических значений параметров режима нагружения, приводящих к задиру, т.е. нахождения границ применимости исследуемой пары. Косвенные методы основаны на определении параметров микрогеометрии, микроструктуры поверхностных слоев, физико-механических свойств, их изменения в процессе трения в целях прогнозирования совместимости. Окончательный же ответ на вопрос о совместимости материалов могут дать лишь ресурсные полные испытания.

Антифрикционные материалы используются преимущественно в ответственных узлах, подшипниках, шарнирах, направляющих скольжения и качения, распределительных валах, клапанных и кулачковых механизмах и т.д.

Цапфы подшипников скольжения обычно изготавливают из сталей и чугунов.

Наиболее часто применяют легированные стали: марганцовистые (35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2 и др.), хромомолибденовые (30ХМ, 3ХМА, 35ХМ, 38ХМ), хромоникелевые (40ХН, 45ХН, 30ХН3А и др.), хромоникелевые с бором (30ХНР, 40ХНР) и хромомарганцовистоникелевые с бором (40 ХГНР). Детали подвергают либо объемной закалке с отпуском, либо поверхностной закалке токами высокой частоты (ТВЧ).

Для подшипников скольжения (вкладышей, втулок шарниров и др.) используются различные антифрикционные сплавы. К ним относятся сплавы на медной, цинковой, алюминиевой и оловянно-свинцовой основах. Последние получили название баббитов. Изредка применяют антифрикционные чугуны с графитными включениями.

Баббиты и чугуны применялись на начальном этапе развития техники и имеют лишь историческое значение. По мере роста мощности двигателей, ужесточения режима эксплуатации, снижения металлоемкости произошел переход к более твердым подшипниковым материалам на медной, цинковой и алюминиевой основах, хорошо совместимых со сталями.

Медные антифрикционные материалы разделяются на бронзы и латуни. Бронзы — это сплавы меди, цинка и олова с оловом и другими элементами. У них цинк и никель не являются главными легирующими компонентами. Наиболее распространены оловянистые бронзы. Неосновными легирующими элементами являются свинец, никель, фосфор, цинк, железо и др.

Меньшее распространение, чем бронзы, получили латуни. Наиболее часто в качестве антифрикционных материалов используют кремнистые и марганцовистые латуни, а также алюминиево-железистые.

В качестве подшипниковых материалов успешно применяются цинковые сплавы с легирующими элементами в виде меди, цинка и олова, алюминия, магния. Низкая температура плавления (400 °С) и повышенная размягчаемость обеспечивают хорошую прирабатываемость. Из них делают биметаллические вкладыши подшипников скольжения. В стальной стакан заливается цинковый сплав, который ровным слоем покрывает внутреннюю поверхность. Другим способом изготовления вкладышей является штамповка их из биметаллической полосы, состоящей из стали и цинкового сплава и получаемой методом горячей прокатки. Такие вкладыши используются в некоторых видах тракторных двигателей.

В современном автомобиле- и тракторостроении широкое распространение получили антифрикционные сплавы на основе алюминия. Алюминиевые сплавы обладают сравнительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью, дешевы и недефицитны, имеют низкую плотность и высокую теплопроводность. В качестве легирующих элементов используются олово, медь, никель, кадмий, кремний, железо, марганец, титан и другие элементы. В автомобилестроении наиболее распространены алюминиево-оловянистые сплавы с содержанием олова до 22,5 %. При содержании

олова более 9 % возможно применение вкладыша без покрытия мягким металлом. В других случаях на рабочую поверхность наносится защитный слой олова. Наибольшее распространение получил сплав АО20–1 (1 % — Ca, 20 % — Sn, 0,02–0,1 % — Ti, остальное — Al). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой. При нарушении режима гидродинамической смазки и возникновении металлического контакта на поверхности вкладыша и цапфы образуется защитная пленка мягкой фазы — олова, внутри которой и локализуются сдвиговые деформации.

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляются механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди, цинка, олова и железа.

Материалы на основе меди, цинка и олова получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигателей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются медно-графитовые компоненты с содержанием графита до 75 %. Для улучшения свойств электрощеточных материалов в них добавляют олово, цинк, свинец. Графит обеспечивает смазывание контакта и электропроводность.

В качестве подшипниковых материалов также используются пористые оловянные бронзы. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5–1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от –60 до +120 °С с коэффициентом трения 0,01–0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В таблице 1 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

В подшипниках мотоциклов, тракторов, насосов используются бронзографитные материалы. Они выдерживают большие нагрузки и скорости скольжения, чем бронзы.

В двигателях грузовых автомобилей, судовых и железнодорожных дизелях в России и других ведущих странах зарубежья используются свинцовистые бронзы. Обычно стальная лента сначала покрывается электролитическим слоем меди, цинка и олова, на которую наносится порошок свинцовистой бронзы.

Порошок припекается к ленте в конвейерной печи. После припекания производится обжатие ленты методом прокатки. Из ленты штампуют заготовки вкладышей, которые затем механически обрабатываются. На заключительной стадии электролитическим способом наносится слой мягкого металла (свинца, олова, меди, цинка и олова, индия).

Аналогичным способом получают и используют спеченные латуни, сложнoleгированные бронзы. Помимо графита, в качестве самосмазывающей добавки используют дихалькогениды металлов: дисульфиды, диселениды, дителлуриды и др.

#### *Композиционные материалы и детали трения*

Композиционные материалы и детали трения, представляющие собой дихалькогениды тугоплавкого металла (в качестве твердой смазки), в металле относятся к одной из перспективных групп антифрикционных материалов. Они сочетают прочность металлической основы (Cu, Ni, Co, Mo, Ag и их сплавы) с антифрикционными свойствами дихалькогенидов ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ). Методы порошковой металлургии, позволяющие варьировать состав материала и технологические параметры его изготовления, открывают широкие перспективы при создании материалов с наперед заданными свойствами.

Детали из композиций с твердыми смазками обеспечивают надежную и длительную работу узлов трения различных устройств и механизмов в высоком вакууме (до  $10^{-13}$  мм рт. ст.) или средах инертных газов, при воздействии радиации (до  $10^8$  рад), в диапазоне температур 3–973 К. Длительный неподвижный контакт в космическом вакууме не приводит к ухудшению трибомеханических характеристик пары трения, при этом коэффициент трения в вакууме составляет 0,08–0,20, интенсивность износа  $10^{-8}$ – $10^{-10}$ .

Детали легко обрабатываются на металлорежущих станках, имеют срок хранения 12 лет. Применяются в качестве деталей зубчатых передач высокой точности, кулачков и других деталей сложной формы, подвергающихся механической обработке.

Дихалькогениды металла, а также нитрид титана, могут наноситься ионно-плазменным, электроискровым и некоторыми другими методами на детали из алюминия, титана или стали, что способствует повышению грузоподъемности узла трения и снижению его веса. Методы нанесения покрытий обеспечивают заданный химический состав и прочное соединение с подложкой. Толщина покрытия регулируется в пределах 1–4 мкм.

*Пористые порошковые материалы, полученные методом порошковой металлургии*

Отличительной особенностью является наличие равномерной объемной пористости, которая позволяет получать требуемые эксплуатационные свойства.

Антифрикционные материалы (пористость 15...30 %), широко применяющиеся для изготовления подшипников скольжения, представляют собой пористую основу, пропитанную маслом. Масло поступает из пор на поверхность, и подшипник становится самосмазывающимся, не требуется подводить смазку извне. Это существенно для чистых производств (пищевая, фармацевтическая отрасли). Такие подшипники почти не изнашивают поверхность вала, шум в 3...4 раза меньше, чем от шариковых подшипников.

Подшипники работают при скоростях трения до 6 м/с при нагрузках до 600 МПа. При меньших нагрузках скорости скольжения могут достигать 20...30 м/с. Коэффициент трения подшипников 0,04...0,06. Для изготовления используются бронзовые или железные порошки с добавлением графита (1...3 %). Разработаны подшипниковые спеченные материалы на основе тугоплавких соединений (боридов, карбидов и др.), содержащие в качестве твердой смазки сульфиды, селениды и гексагональный нитрид бора. Подшипники могут работать в условиях вакуума и при температурах до 500 °С. Применяют металлопластмассовые антифрикционные материалы: спеченные бронзографиты, титан, нержавеющие стали пропитывают фторопластом. Получаются коррозионностойкие и износостойкие изделия. Срок службы металлопластмассовых материалов вдвое больше, чем материалов других типов.

*Антифрикционные материалы, полученные вакуумными методами*

Перспективным направлением получения антифрикционных материалов являются вакуумные методы нанесения антифрикционных покрытий, в том числе и ионно-плазменные, о которых мы будем говорить ниже. Несмотря на то, что вакуумные методы требуют дорогостоящего оборудования и технологических затрат, квалифицированного персонала, тем не менее они оказываются экономичнее, чем получение сплавов, о которых мы говорили выше. Дело в том, что при эксплуатации того или иного узла трения износ определяется иногда долями миллиметра или, в лучшем случае, несколькими миллиметрами. После этого деталь нужно либо реставрировать, либо «выкидывать». Если же мы наносим антифрикционное или фрикционное покрытие на металлическую основу, имеющую малую стоимость (например, сталь Ст3 или Ст45), то экономический эффект очевиден.

В настоящее время для получения антифрикционных или фрикционных покрытий на металлическую основу используются композиционные катоды.

Получение композиционных катодов в настоящее время проводится методом порошковой металлургии. Однако этот метод имеет недостатки, связанные с большой анизотропией свойств катодов из-за использования высоких давлений при спекании порошков.

Нами разработан метод получения композиционных катодов. Суть этого метода заключается в следующем. Был изготовлен катод из титана. На торцевой части титанового катода по концентрическим окружностям высверливались углубления диаметром 5 мм и глубиной 4 мм. В эти углубления засыпалась и прессовалась смесь порошка меди, цинка и олова. Подготовленный катод помещался на вращающийся столик в вакуумной камере установки ННВ-6.6И1. Затем катод нагревался до температуры плавления смеси. В некоторых случаях использовалось центральное отверстие. Нагрев осуществлялся пучком ионов аргона от многоамперного источника ионов с полым катодом. Результаты показаны на рисунках 1–4.



Рис. 1. Композиционный катод на специальной подставке в вакуумной камере

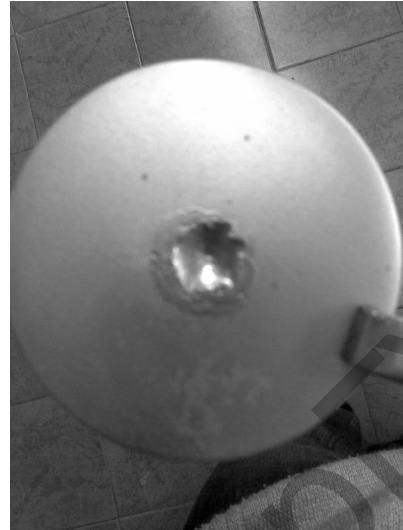


Рис. 2. Образец полученного катода на основе сплава меди



Рис. 3. Образец полученного катода на основе сплава цинка

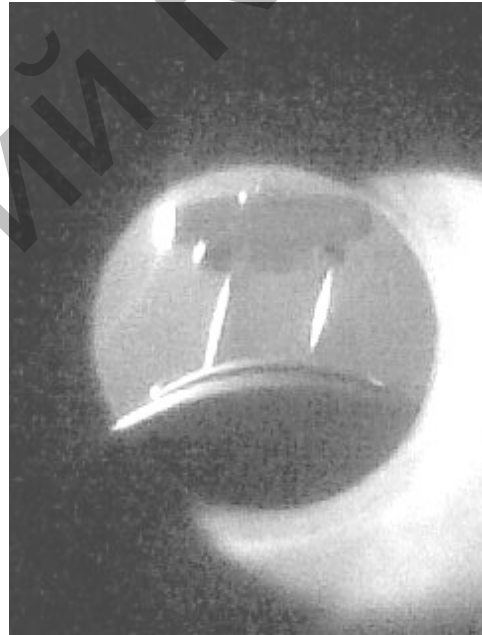


Рис. 4. Образец катода на основе сплава олова в вакуумной камере

### *Поверхностное натяжение и трение*

Силу трения скольжения в случае молекулярного механизма можно представить в виде:

$$F_{\text{тр}} = \int_L \sigma dl \approx \sigma L, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение твердого тела;  $L$  — длина пройденного при скольжении пути.

Для металлов поверхностное натяжение определено при гомогенном образовании центров кристаллизации при затвердевании расплавов, т.е. в жидкой фазе, когда подвижность атомов существенна [17]. В таблице 1 представлены некоторые данные, полученные в этой работе и представляющие для нас интерес.

## Поверхностное натяжение некоторых металлов в жидкой капле [17]

Металл	$\sigma_{ж}$ , эрг/см <sup>2</sup>	Металл	$\sigma_{ж}$ , эрг/см <sup>2</sup>
Свинец	33,3	Серебро	126
Олово	59	Золото	132
Железо	204	Медь	177
Алюминий	93	Никель	265
Кобальт	234	Платина	208

Для зависимости температуры плавления малых частиц от их размера мы получили следующее выражение:

$$T_{пл} = T_0 \left( 1 - \frac{r_k}{r} \right), \quad (3)$$

где  $T_0$  — температура плавления массивного образца;  $r_k = 2\sigma\upsilon/RT$ .

На рисунке 5 показана такая зависимость из работы [18].

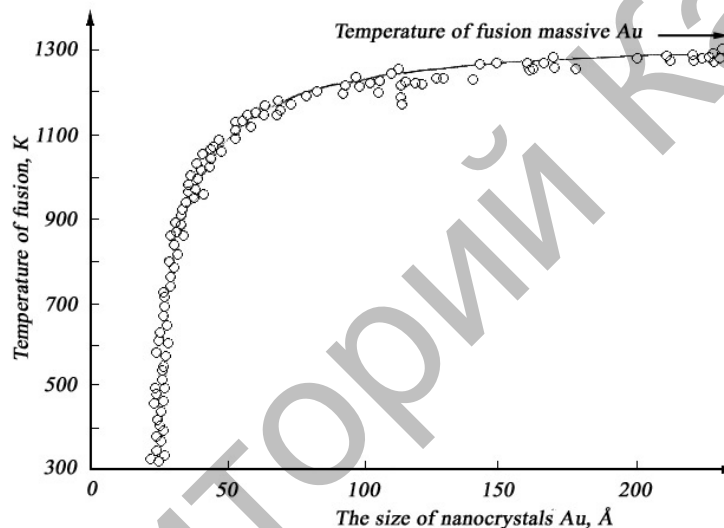


Рис. 5. Температура плавления нанокристаллов золота как функция их размера [18]

Зависимость на рисунке 5 с большой точностью описывается выражением (3). В результате расчетов нами получено  $\sigma_{Au} = 366$  эрг/см<sup>3</sup>.

Сравнивая это значение с данными таблицы 1, видим, что в твердой фазе поверхностное натяжение для золота примерно в 3 раза больше, чем в жидкой.

Аналогичная закономерность наблюдается и для других металлов, что отражено в таблице 2.

## Поверхностное натяжение некоторых металлов в твердой фазе

Металл	$\sigma_{т}$ , эрг/см <sup>2</sup>	Металл	$\sigma_{т}$ , эрг/см <sup>2</sup>
Свинец	100	Серебро	375
Олово	177	Золото	396
Железо	612	Медь	531
Алюминий	279	Никель	795
Кобальт	702	Платина	624

Поскольку сила трения скольжения в (2)  $F_{тр} = kN$ , то на основе таблицы (2) нетрудно получить для коэффициента трения в паре металл — металл значения, представленные в таблице 3.

Теоретические значения коэффициента трения скольжения в паре металл–металл

Пара трения	$k$	Пара трения	$k$
Свинец — свинец	0,1	Серебро — серебро	0,4
Олово — олово	0,2	Золото — золото	0,4
Железо — железо	0,6	Медь — медь	0,5
Алюминий — алюминий	0,3	Никель — никель	0,8
Кобальт — кобальт	0,7	Платина — платина	0,6

Приведенные выше данные содержат приближенную оценку коэффициентов трения скольжения и поэтому пригодны лишь для приближенных технических расчетов. В некоторых случаях приходится ставить особые эксперименты для определения более точных значений коэффициентов трения. Однако для прогнозирования пар трения изложенный выше подход имеет практическое значение.

#### Поверхностное натяжение и свойства покрытий

В последние десятилетия технологиям нанесения износостойких, жаростойких, коррозионно-стойких, фрикционных и антифрикционных, декоративных покрытий уделяется большое внимание во всех промышленно развитых странах. Это обусловлено как дефицитом специальных сталей и сплавов, так и их высокой стоимостью.

Как было отмечено выше, для осаждаемых покрытий (гальванических, газотермических, ионно-плазменных и т.д.) метода определения поверхностного натяжения нет. Предлагаемым нами методом предусматривается измерение поверхностного натяжения путем определения зависимости микротвердости от толщины осаждаемого покрытия.

Это достигается тем, что по измеренному тангенсу угла наклона зависимости микротвердости покрытия от его обратной толщины вычисляется величина его поверхностного натяжения. Зависимость микротвердости осаждаемого покрытия от его толщины описывается формулой, аналогичной (3):

$$\mu = \text{const} \cdot \left(1 - \frac{d}{h}\right), \quad (4)$$

где  $\mu$  — микротвердость осаждаемого покрытия;  $h$  — толщина осаждаемого покрытия. Параметр  $d$  связан с поверхностным натяжением  $\sigma$  формулой:  $d = 2\sigma/RT$ . Метод мы применяли для определения поверхностного натяжения нитрид-титановых упрочняющих покрытий на сталь X12, полученных методом вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий на промышленной установке ННВ-6.6И1. Микротвердость определялась микротвердомером ПМТ-3. Толщина покрытия определялась либо по времени осаждения покрытия, либо по косым шлифам с помощью металлографического оптического микроскопа Эпиквант. Результаты показаны на рисунке 6.

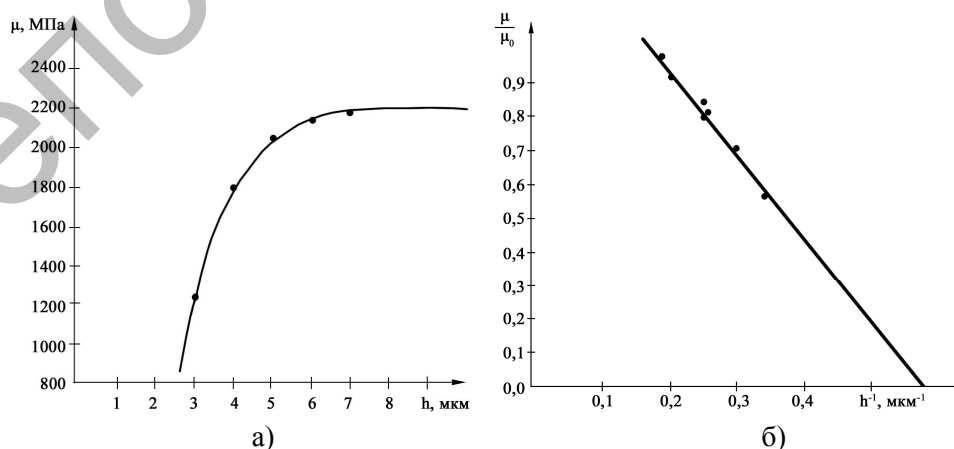


Рис. 6. Зависимость микротвердости от толщины (а) и обратной толщины (б) нитрид-титанового покрытия на стали X12

В координатах  $\mu \sim 1/h$  экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (4), давая значение  $h = 1,3$  мкм. Для нитрида титана  $\vartheta = 11,44$  см<sup>3</sup>/моль и для поверхностного натяжения получено:  $\sigma = 474$  эрг/см<sup>2</sup>. Для коэффициента трения скольжения в паре нитрид титана–нитрид титана имеем  $k = 0,5$ .

### Заключение

Трение представляет собой сложный процесс, который зависит от большого количества факторов. Однако даже простые качественные модели могут помочь в выборе конструкционных материалов для узлов трения.

Использование предложенного в настоящей работе метода определения поверхностного натяжения осаждаемых покрытий позволит управлять технологическими процессами получения покрытий с заданными свойствами и, соответственно, эксплуатационными характеристиками изделий с покрытиями.

### Список литературы

1. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. — М.: Наука, 1976. — 256 с.
2. Способ измерения поверхностного натяжения твердых тел. Патент РК № 57691 / Юров В.М. и др. — Астана, 2009.
3. Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков. Патент РК № 58155 / Юров В.М. и др. — Астана, 2009.
4. Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов. Патент РК № 58158 / Юров В.М. и др. — Астана, 2009.
5. *Крагельский И.В.* Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968. — 350 с.
6. *Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
7. *Мышкин Н.К., Пстроковец М.И.* Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 310 с.
8. *Буяновский И.А., Фукс И.Г., Багдасаров Л.Н.* Очерки по истории трибологии. — М.: Нефть и газ, 1998. — 108 с.
9. *Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н.* Граничная смазка: этапы развития трибологии. — М.: Нефть и газ, 2002. — 230 с.
10. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
11. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с.
12. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. — М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.
13. *Заславский Ю.С., Артемьева В.П.* Новое в трибологии смазочных материалов. — М.: Нефть и газ, 2001. — 480 с.
14. *Дроздов Ю.Н.* Ключевые варианты в расчетах интенсивности изнашивания при трении // Машиноведение. — 1980. — № 2. — С. 93–99.
15. *Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В.* Моделирование трения и изнашивания в машинах. — М.: Машиностроение, 1982. — 262 с.
16. *Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д.* Материалы в триботехнике нестационарных процессов. — М.: Наука, 1986. — 240 с.
17. *Овсиенко Д.Е.* Зарождение центров при кристаллизации в переохлажденных жидких металлах // Проблемы современной кристаллографии. — М.: Наука, 1986. — С. 127–149.
18. *Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. и др.* Введение в физику поверхности. — М.: Наука, 2006. — 490 с.