

УДК: 621.45.038.7

ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК

© Леонид Николаевич Лесневский¹⁾, Лев Юрьевич Лежнёв²⁾,
Максим Александрович Ляховецкий¹⁾

1) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский Авиационный Институт (Национальный исследовательский университет)" МАИ, Москва

2) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский Государственный Машиностроительный университет" МАМИ, Москва

l.lesnevskiy@yandex.ru

Аннотация. В последние годы всё больший интерес вызывают плазменные методы формирования покрытий и плёнок на рабочих поверхностях узлов трения тепловых двигателей и энергоустановок. В работе представлены результаты исследований и разработок покрытий, полученных с использованием плазмы: в атмосфере - методами плазменного напыления, в вакууме – осаждением в магнетронной распылительной системе и в жидкости - микродуговым окислением в электролите. На конкретных примерах показана эффективность этих методов для формирования покрытий.

Ключевые слова: плазменные покрытия, плёнки, твёрдая смазка, двигатели, энергоустановки, износостойкость, коэффициент трения

PLASMA METHODS OFFORMING WEAR RESISTANT COATINGS FOR HEAT ENGINES AND POWER PLANTS

© L.N. Lesnevskiy¹⁾, L.Yu. Lezhnev²⁾, M.A. Lyakhovetskiy¹⁾

1) Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia,

2) Moscow State Engineering University, MAMI, Moscow, Russia

Abstract. In recent years, the interest to forming by plasma methods of wear resistant coatings on working surfaces the friction units of heat engines and power plans have increased, considerably. In this paper the results of researches and developments such coatings, obtaining in air - by plasma spraying, in vacuum – by magnetron sputter deposition and in liquid – by micro-arc oxidation in electrolyte are presented. On the specific examples the efficiency of these methods for wear resistant coatings forming is shown.

Key words: plasma coatings, films, solid lubricant, engines, power plants, wear resistant friction coefficient.

Возросший интерес к плазменным и вакуумно-плазменным методам формирования износостойких и твёрдосмазочных покрытий объясняется их широкими технологическими возможностями, позволяющими: формировать в едином технологическом цикле практически любые композиции и конструкции покрытий, проводить плазмохимические процессы синтеза новых соединений для применения их в составе композиционных покрытий, формировать покрытия диффузионно-покровного типа, состав которых является продуктом взаимодействия компонентов насыщающей среды с материалом поверхностного слоя,

реализуя импульсные режимы плазменной обработки, аморфизировать поверхностный слой или формировать аморфные покрытия, проводить очистку от загрязнений и обезгаживание поверхностного слоя детали, проводить поверхностную термообработку, в том числе с оплавлением материала, используя комбинацию различных плазменных и вакуумно-плазменных методов получать износостойкие покрытия с заданными свойствами недостижимыми никакими другими методами.

Однако, несмотря на перспективность, широкого практического применения плазменная и вакуумно-плазменная технологии формирования износостойких и твёрдосмазочных покрытий в производстве тепловых двигателей и энергоустановок пока не нашли. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, недостаточно изучены процессы, протекающие в плазменных и вакуумно-плазменных технологических установках и элементах оборудования, применяемых для формирования таких покрытий, и во-вторых, не разработаны опытные технологии их формирования методами плазменной и вакуумно-плазменной технологий и не проведены испытания опытных серий деталей и образцов, которые могли бы доказать эффективность новых технологических процессов. Классификация методов, используемых в плазменной и вакуумно-плазменной технологии износостойких и антифрикционных покрытий (в том числе и твёрдосмазочных), и дающих представление об их многообразии и различии в физической и технической реализации, приведены во многих публикациях [1-5]. Для формирования таких покрытий и использования их в составе узлов трения тепловых двигателей и энергоустановок с учетом сказанного выше, а также наличия и доступности плазменного технологического оборудования в настоящей работе используются следующие методы.

Технология плазменного напыления покрытий в атмосфере (plasma spraying – PS) базируется на использовании низкотемпературной плазмы, получаемой в плазмотронах, в которых потоки плазмы газообразных веществ имеют энергию частиц в несколько эВ (до 30000°С). Такая плазма используется в технологических процессах в основном как высокотемпературный газ для нагрева и транспортировки к подложке частиц 30-110 мкм различных материалов со скоростью до 400 м/с. Покрытие формируется не из атомарных частиц, а из макрочастиц (капель), поэтому оказывается пористым (2-15%) и зачастую оказывается эффективным в узлах трения при правильно подобранных материалах в сочетании с обычной смазкой. Магнетронные распылительные системы (magnetron sputtering deposition - MSpD), в которых, благодаря созданию над поверхностью распыляемого в вакууме катода (мишени) системы скрещенных электрических и магнитных полей и существованию области 100% ионизации рабочего тела – аргона, в аномальном тлеющем разряде, распыляют практически любые металлы и сплавы с сохранением их стехиометрии на поверхности осаждения. Скорость осаждения атомарных частиц распыления до 50 нм·с⁻¹ [6]. Уступая в производительности таким вакуумным методам, как электронно-лучевое испарение и осаждение покрытий из катодных пятен вакуумной дуги, магнетронная система имеет известные преимущества благодаря сохранению стехиометрии осаждаемых плёнок при распылении мишеней сложного состава, высокой чистоты покрытий и возможностей в эффективной реализации плазмохимических реакций, что крайне важно, особенно для получения износостойких плёнок типа нитридов, карбидов и т.п.

Процесс микродугового оксидирования металлов «вентильной» группы, используемый для получения высокоизносостойких композиционных керамических покрытий, протекает в электролите при высоких напряжениях ~ 1000 В. Напряженность электрического поля при этом достигает 10⁶ В/м и более, что приводит к пробоям (системе микродуг на обрабатываемой поверхности) первоначально сформировавшейся анодной пленки. Поиски режимов оксидирования при таких напряжениях, позволяющих получить плотные покрытия с высокой адгезией, привели к использованию микродугового анодирования и катодирования

в одной технологической операции на одной детали. Такой процесс получил название анодно-катодного микродугового оксидирования (АКМДО) или сокращенно МДО.

Особый интерес вызывает возможность изготовления, например, деталей двигателя внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов с последующим упрочнением рабочих поверхностей методом микродугового оксидирования (МДО) и абразивной обработкой сформированных покрытий в заданный размер. По данным [7], исследования, проводимые во всех странах, производящих автомобили и энергоустановки на базе ДВС, в направлении уменьшения массы ДВС и улучшения технологичности их изготовления привели к разработке двигателей с блоком цилиндров из алюминий-кремниевых сплавов без чугунных гильз. Эта замена, хоть и требует небольшой доработки блока цилиндров в направлении увеличения жёсткости конструкции (модуль упругости силуминов, например, в несколько раз ниже, чем у чугуна), но позволяет улучшить ряд основных показателей потребительских качеств и технологичности, таких как:

- снижение массы ДВС примерно на 50%, что позволяет уменьшить массу и других деталей (рамы, подвески и др.), повысить технологичность и экономичность их изготовления на производстве;

- лучшая теплопроводность алюминиевых блоков цилиндров позволяет уменьшить массу радиатора; обеспечивает более быстрый прогрев двигателя, и как следствие, снижение выбросов несгоревших углеводородов, а более быстрый выход на рабочий температурный режим катализатора позволяет значительно снизить токсичность отработавших газов;

- вследствие одинаковых коэффициентов теплового расширения поршня (практически всегда выполняемого из алюминиевого сплава) и цилиндра монтажный зазор поршня может быть значительно уменьшен с 0,05-0,06 до 0,01-0,02 мм по сравнению с чугунным, что принципиально повышает эффективность работы двигателя и позволяет снизить токсичность отработавших газов. Как следует из работы [8], примерно половина всех блоков изготавливается в мире из алюминиевых сплавов, однако большинство из них – это алюминиевые блоки с чугунными гильзами. Это связано с тем, что современные технологии защиты рабочих поверхностей алюминиевых блоков цилиндров покрытиями (Cromal, Nikasil, газотермические покрытия) достаточно сложные и дорогостоящие. Разработанный и широко внедряемый в настоящее время, особенно в авиационно-космических производствах, метод микродугового оксидирования (МДО) алюминиевых сплавов позволяет экономично и эффективно получить на поверхности этих сплавов износостойкие композиционные керамические покрытия с низкими значениями коэффициентов трения до 0,014 [9]. Важным моментом в понимании процессов трения и смазки, и в частности, в тепловых двигателях, в том числе двигателях внутреннего сгорания (ДВС) или энергоустановках на их основе, является то обстоятельство, что значения коэффициентов трения в них меняются в широких пределах: от $0,2 \leq f \leq 1,0$ для компонентов, работающих без смазки или в области граничной смазки, и от $f \approx 0,001$ для компонентов с гидродинамической смазкой. Качественную связь различных режимов трения (смазки) через зависимость коэффициента трения от комплекса $\mu V/p$, где μ - абсолютная вязкость смазки, V - скорость скольжения, p - нагрузка на узел можно оценить с использованием известной диаграммы Штрибека (рис. 1) [10].

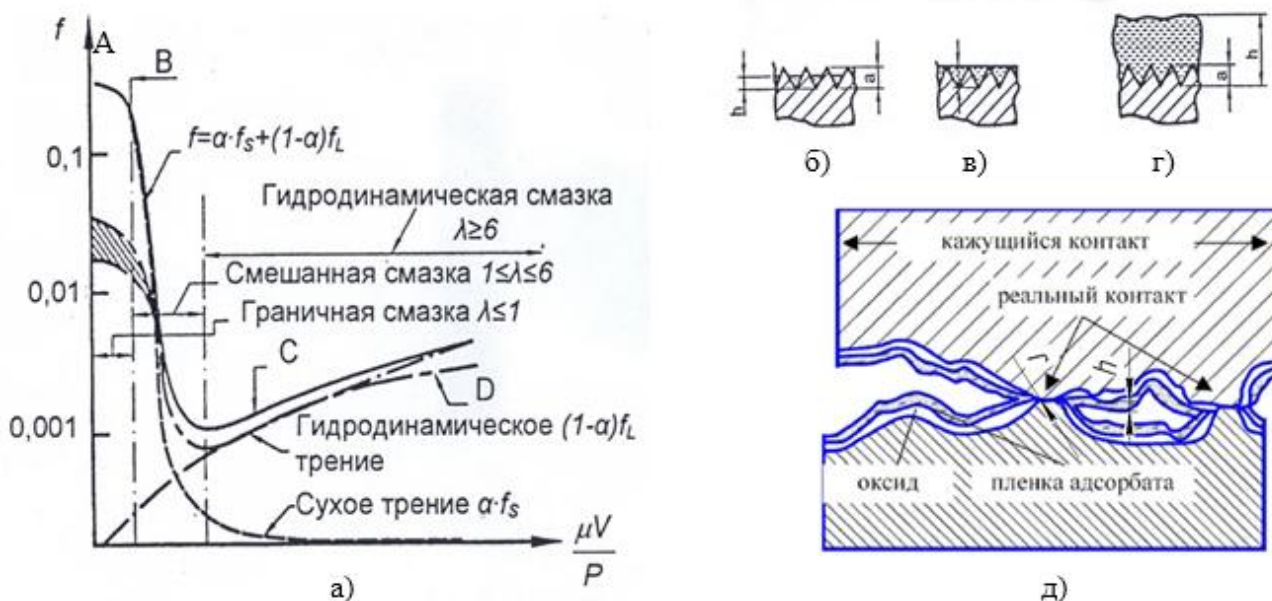


Рис.1. Диаграмма Штрибека и контакт тел в условиях граничной смазки [9]

При использовании в качестве смазки масла режимы трения определяются значением параметра $\lambda = h/a$, где h - толщина масляной пленки, a - высота неровностей. Согласно [10] область $A \rightarrow B$ на рис. 1а принадлежит области граничной смазки, где $\lambda \leq 1$ (рис. 1б,в), и где сила трения определяется только материалом и свойствами трущихся поверхностей, а также величиной приложенной нагрузки. Область C - это область гидродинамической смазки, когда $\lambda > 6$ (рис. 1г), где сила трения зависит от толщины масляной пленки h , вязкости масла μ скорости скольжения V и величины приложенной нагрузки p , при этом толщина масляной пленки обратно пропорциональна приложенной нагрузке. Предельные значения коэффициента трения в этом случае представлены кривой C (рис. 1а). Для неравенства $1 \leq \lambda \leq 6$ характерен смешанный режим смазки, и результирующее общее трение складывается из действия двух механизмов, упомянутых выше.

Как следует из молекулярно-механической теории трения [11] на площадках реального контакта поверхностей при трении (рис. 1) действует сила трения T , представляющая собой сумму двух составляющих: молекулярной T_S (от действия молекулярных сил притяжения при сближении тел на расстояние $\leq 10^{-7}$ см) и механической T_L (от деформирования внедренными неровностями менее жесткого поверхностного слоя тела в контакте). Обозначая через A_r - фактическую (реальную) площадь контакта, а также, принимая за α - долю A_r , где происходит действие молекулярных (адгезионных) сил, то согласно аддитивности составляющих силы трения, подтвержденной экспериментально [12], можно записать, что $T = \alpha T_S + (1 - \alpha) T_L$, откуда получается выражение для соответствующих коэффициентов трения: $f = \alpha f_s + (1 - \alpha) f_L$. На рис. 1а показан характер изменения величины коэффициента трения f и двух ее составляющих при использовании масла в качестве смазки в контакте трения. С увеличением нагрузки на гидродинамический контакт (область $\lambda \leq 6$) пленка масла, разделяющая две поверхности, становится тоньше, а неровности на одной поверхности начинают контактировать с неровностями на другой. Эта ситуация характерна для смешанного трения, при котором нагрузка выдерживается частично сжатием жидкой пленки и частично взаимодействием твердых поверхностей ($1 \leq \lambda \leq 6$). При граничном трении ($\lambda \leq 1$) поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала (адсорбент масла) весьма малой толщины (от толщины одной молекулы и до 0,1 мкм). Сопротивление движению, например, при скольжении, складывается из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления "пропахивания" поверхностей внедрившимися элементами

поверхности. В некоторых местах контакта, где наиболее значительна пластическая деформация или высокие локальные температуры происходит разрушение тонкой ($\leq 0,1$ мкм) смазочной пленки с возникновением адгезии и даже схватывания металла на микроучастках.

Предельное трение (кривая $S_{на}$ рис. 1а) можно уменьшить, как в гидродинамическом, так и в гранично-смешанном режимах, формируя на одной или обеих поверхностях трения слои ТСП, имеющих большое число мелких (до 0,1 мм) полостей или пор для накопления масла или твердого смазочного материала (типа графита и др.), или масла с подмешанным в него дисперсным порошком графита или MoS_2 . Выбор ТСП в этом случае определяется требованиями к условиям эксплуатации. Опробывание различных материалов, включая упрочненные стали, нитрид кремния, окись алюминия, покрытия на основе никель-графита и др. [9], дали привлекательные значения коэффициентов трения и износа, как в сухих, так и в традиционных условиях масляной смазки. Благодаря постоянному присутствию на поверхности трения пленки масла или ТСП (накапливаемых в порах), при условии, что поверхности (подложки) имеют высокое значение предела текучести при сжатии σ_T , и особенно при низких скоростях и высоких давлениях, на такой поверхности появляются более низкие значения коэффициентов граничного трения и предельная кривая S на диаграмме Штрибека сдвигается вниз и влево, (кривая D на рис. 1а).

На рис. 1д показаны две поверхности трения с предельными зонами контакта трущихся поверхностей в условиях граничной смазки. Эти зоны объединяются в реальную площадь контакта A_r , равную $A_r = p / \sigma_T$ где p – нормальная сила, σ_T – предел текучести при сжатии более слабого материала контакта [12]. Остальные поверхности трения покрыты оксидными и адсорбционными смазывающими пленками, которые до определенной нагрузки p препятствуют контакту металла с металлом рабочих поверхностей. Если $\sigma_{Ta} < \sigma_{Tb}$ (рис. 1д), то $A_r = p / \sigma_{Ta}$, а сила трения в этом случае будет равна молекулярной составляющей силы трения $T_S = f_s A_r \sigma_{Ta}$, т.е. пропорциональна площади реального контакта.

Из адгезионной теории [11] известно, что при достаточно высоких нагрузках в зонах контакта происходит образование так называемых "мостиков сваривания", которые должны быть разорваны при движении. Поэтому сила трения T_S зависит в этом случае от сопротивления сдвигу этих мостиков и может быть записана в виде $T_S = A_r \tau_s$, где τ_s – предел прочности на сдвиг более слабого материала деталей пары трения. Из двух полученных выражений для T_S следует, что в случае сухого трения (т.е. при полном отсутствии какой-либо смазки) коэффициент трения равен $f_s = \tau_s / \sigma_{Ta}$. Поскольку задача использования материала ТСП, как и смазочных масел заключается в исключении образования подобных "мостиков сваривания", исключении непосредственного контакта между поверхностями пары трения, и следовательно снижению затрат энергии на разрушение этих мостиков, и снижению износа в зонах этих контактов, то механическая (деформационная) составляющая силы трения T_L с использованием ТСП может быть определена по аналогичному для T_S выражению: $T_L = A_r \tau_L$, где τ_L – предел прочности на сдвиг материала ТСП. Тогда выражение для суммарной силы трения при использовании ТСП может быть записано как $T = A_r [\alpha \tau_s + (1 - \alpha) \tau_L]$. Следует отметить, что молекулярная T_S и деформационная T_L составляющие силы трения T взаимно связаны и арифметическое сложение их при определении общей силы трения можно использовать только в качестве первого приближения.

При достаточно толстом слое ТСП и, соответственно, отсутствии контакта между рабочими поверхностями трения $\alpha = 0$, сила трения равна $T_L = A_r \tau_L$ и ее низкое значение обеспечивается низким значением сопротивления сдвигу материала ТСП, и малой величиной площади реального контакта, обусловленной наличием малодеформируемой твердой основы (подложки), и коэффициент трения f_L , как показано выше, в этом случае $f_L = \tau_L / \sigma_L$, где σ_L относится к характеристике основы. В общем случае последовательное истирание ТСП до полного его удаления приведёт к увеличению коэффициента трения и заеданию поверхности даже при малых нагрузках. Итак, на основе этой трактовки контактного механизма, такой подход дает вполне разумную картину трения контактов с ТСП. Диаграмма Штрибека в этом случае

также может быть использована для качественной оценки трения с ТСП. Область гидродинамической смазки в этом случае будет соответствовать наличию толстого слоя ТСП, и по мере изнашивания ТСП и появления зон непосредственного контакта поверхностей трения, картина трения будет аналогична картине граничной смазки, описанной выше. Анализ полученного выше выражения для коэффициента трения материала ТСП $f_L = \tau_L / \sigma_T$ позволяет в первом приближении сделать вывод о формировании в качестве ТСП покрытий из мягкого материала (например, индия, свинца, олова и т.п.) на твердой подложке. Поскольку в этом выражении отсутствует толщина покрытия, его влияние можно косвенно оценить из того, что при использовании все более толстых пленок мягких металлов, прилегающих, к контакту, в слое ТСП будет преобладать мягкий материал, и, следовательно, σ_T (предел текучести при сжатии более слабого материала контакта) станет меньше, а коэффициент трения f возрастет. Поэтому для этого случая истинный коэффициент трения лежит в диапазоне между максимальным f_{max} и минимальным значением f_{min} и подчиняется неравенству $\tau_L / \sigma_T \leq f \leq \tau_L / \sigma_L$, где σ_L - предел текучести при сжатии материала ТСП. Этот процесс проявляется, по данным [13], при толщинах, превышающих 10 мкм.

Кроме того, такую оценку можно применить для легко нагруженных контактов. Для тяжело нагруженных контактов низкий коэффициент трения f обеспечивается низким сопротивлением сдвига материала смазочной пленки τ_L и малой величиной площади реального контакта A_r , обусловленной наличием малодеформируемой твердой основы, т.е. большим значением σ_T [14].

Другим безразмерным отношением, представляющим собой молекулярную составляющую коэффициента трения f_s является отношение τ_s / σ_T , характеризующее главным образом сопротивление поверхностного молекулярного (адгезионного) взаимодействия контактирующих поверхностей на фактических (реальных) площадях касания. Зависимость τ_s от величины удельного давления P_K может быть определена по выражению $\tau_s = \tau_o + \beta P_K$ которое экспериментально подтверждено рядом исследований [15,16], в которых приводятся значения фрикционных параметров τ_o и β для целого ряда металлов и сплавов. Оценка вкладов молекулярной и механической составляющих в суммарный коэффициент трения показывает, что отношение f_s / f_L может меняться в широких пределах - от 100 до 2-3 [17], при этом доля каждой из них зависит от нагрузки, шероховатости и волнистости, механических свойств, молекулярных характеристик пары трения и условий контакта. Для металлов указанное отношение лежит в пределах 45 – 100, в частности для никеля $f_s / f_L \approx 90$.

Проведенный анализ методов формирования ТСП [18], как уже имеющих широкое промышленное применение, так и перспективных, позволил обоснованно выбрать в качестве наиболее перспективных плазменные и ионно-плазменные методы их формирования:

- *плазменное напыление в атмосфере*, благодаря своей универсальности по напыляемым материалам и композициям;

- *осаждение в магнетронной распылительной системе в вакууме*, благодаря своей возможности осаждения тонких пленок ТСП, получаемых как прямым распылением сложных мишеней, так и реактивным распылением;

- *микродуговое окисление в электролите*, позволяющее получать на металлах и сплавах "вентильной" группы (Al, Ti, Nb, Zr и др.) уникальные окислы, обладающие высочайшей адгезией, максимальной микротвердостью и наиболее высокой износостойкостью.

Плазменное напыление в атмосфере. Известно, что в мировой практике защиты контактирующих поверхностей от износа и фреттинг-износа, и в частности, в узлах, работающих в экстремальных условиях, например, в замках вентиляторных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) широко используется технология плазменного напыления ТСП состава CuNiIn (58,5Cu-36,5Ni-5In), около 25 лет тому назад

предложенная фирмой GeneralElectric, США [19]. С учётом наличия в этом покрытии значительной (до 10%) естественной пористости, на его поверхность и внутрь наносилась суспензия дисульфида молибдена MoS_2 , дополнительно защищая место контакта от износа и коррозии. Однако, в условиях существенного ужесточения режимных параметров, когда температура пар трения может достигать $1000...1200^\circ\text{C}$, а контактные давления до $500...600$ МПа и более, возможности увеличения ресурса покрытия CuNiIn с добавками MoS_2 практически исчерпаны. Поэтому в качестве базового материала покрытия, способного обеспечить высокую несущую способность контактирующих поверхностей при сохранении их антифрикционных свойств и износостойкости, а также пригодного для формирования покрытий методом плазменного напыления, были использованы порошки плакированного никель-графита $\text{Ni}[\text{Cg}]$. При этом наличие никеля обеспечивает достаточно жесткий и прочный каркас ТСП, а графит способствовать повышению его износостойкости. В качестве второго варианта такого покрытия был рассмотрен дисульфид молибдена MoS_2 , смешанный с эпоксидным лаком. При проектировании конструкции альтернативного ТСП были рассмотрены два варианта: ТСП плёночного типа и толстослойный ТСП (рис. 2).

Типичный вариант такого современного «плёночного» ТСП общей толщиной до $5...10$ мкм показан на рис 2. Как правило, эти покрытия имеют небольшой ресурс и применяются в узлах трения, в которых длина пути трения незначительна и практически отсутствует унос продуктов изнашивания. Для использования в высоконагруженных узлах трения с повышенным ресурсом при фреттинг-износе наиболее перспективны относительно толстые (до $200...300$ мкм) ТСП, основу которых составляют износостойкие матрицы из неорганических материалов (рис. 2). В этих покрытиях основную функциональную нагрузку несет слой 3 – носитель ТСП, который может быть выполнен как из мономатериала, так и представлять собой матричную композицию из различных компонентов, гарантирующих синергетическое повышение эксплуатационных характеристик ТСП. Слой 4 представляет собой или пропиточный слой с ТСП или слой твердой смазки в виде мономатериала без матрицы, являющийся приработочным слоем с низкой сдвиговой прочностью, и служащий более быстрому и эффективному выходу покрытия на рабочий режим, при этом важным элементом в обоих типах покрытий является наличие адгезионного подслоя 2.

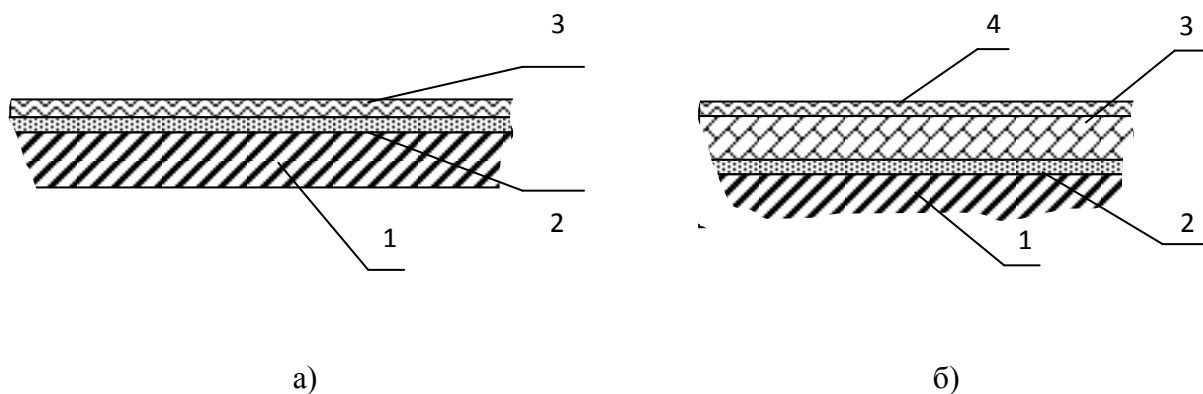


Рис. 2. Варианты ТСП – плёночное (а) и толстослойное (б): 1- подложка; 2- подслоя;

3- слой носитель ТСП; 4- слой с пропиткой ТСП.

Плазменное напыление покрытий осуществлялось с использованием установки «PlasmaTechnik» (Швейцария), оборудованной управляющими консолями, которые обеспечивали управление четырьмя плазмообразующими газами: аргоном, азотом, гелием и водородом. Установка была оснащена порошковыми питателями TWIN 10 фирмы

“Plasmadyne”, плазматронами типа F4 и источником питания с максимальной потребляемой мощностью 55 кВт. Для исследования сухого знакопеременного трения была изготовлена специальная машина трения, схема которой показана на рисунке 3.

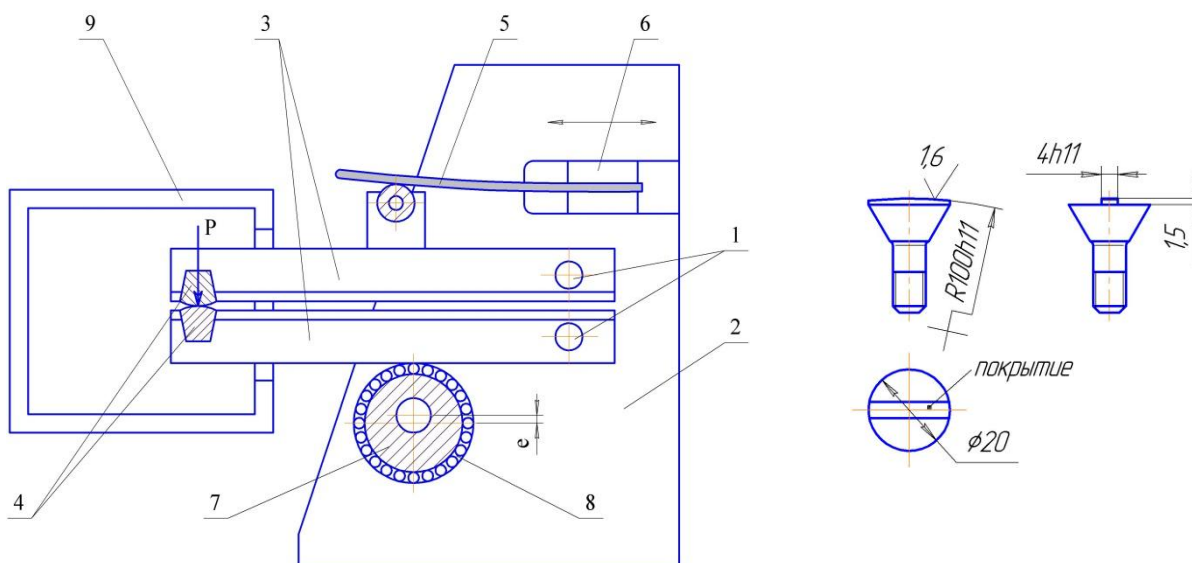


Рис. 3. Машина трения и образец для испытания покрытий: 1- оси рычагов; 2- плиты корпуса установки; 3- рычаги; 4- испытуемые образцы; 5- плоская пружина; 6- узел перемещения пружины; 7- вал; 8- внешняя обойма подшипника; 9- объем моделирования среды трения.

На осях 1, закрепленных между двумя стойками 2 корпуса установки, размещены два рычага 3, на конце которых в специальных гнездах крепятся испытываемые образцы 4. Под действием плоской листовой пружины 5 с помощью узла ее перемещения 6 между образцами 4 образуется контакт трения с усилием P , которое может изменяться при использовании листовых пружин разной толщины. Возвратно-поступательное движение образцов 4 друг относительно друга обеспечивается при вращении вала 7, закрепленном с эксцентриситетом “ e ”, при этом внешняя обойма подшипников 8 находится в постоянном контакте с нижним рычагом. Внешние концы рычагов 3, вместе с образцами 4 могут размещаться в объеме 9, в котором создается требуемая по условиям эксплуатации внешняя среда и температурные условия трения. На рис. 3 представлен чертеж тестовых образцов, которые жестко закрепляются с помощью цанговых зажимов в специальных гнездах машины трения и на рабочие, контактные поверхности которых напыляются исследуемые покрытия.

Изготовленная машина трения позволяет обеспечить следующие условия испытаний на фреттинг-износ: давление в контакте до 1 ГПа, частота до 50 Гц, амплитуда от 0,1 до 2 мм, температура среды от 20 до 800°C. Величина износа определялась по измерению хорды износа на цилиндрической контактной поверхности образца. На рис. 4 показаны зависимости относительной скорости износа $V_{\text{отн.ед.}}$ от времени T мин испытаний для рассмотренных выше материалов и конструкций покрытий. Испытания проводились при следующих условиях: контакт – цилиндр-цилиндр, амплитуда перемещений – 0,2 мм, частота взаимных перемещений – 10,7 Гц, давление Герца в контакте – 600 МПа.

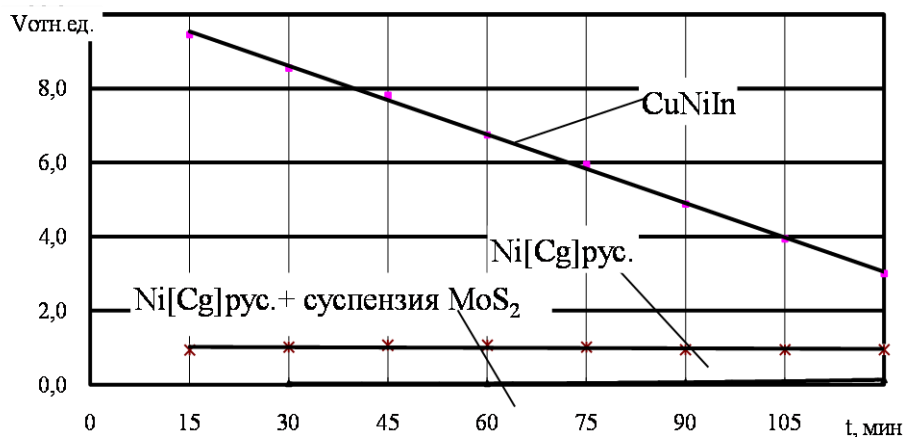


Рис. 4. Скорость износа ТСП в зависимости от времени исследований

Осаждение в магнетронной распылительной системе в вакууме. Композиционное ТСП на рабочие поверхности узлов трения, работающих в экстремальных условиях эксплуатации (криогенная среда, высокие контактные давления), и в частности, на рабочую поверхность контактного уплотнения криогенного узла высокого давления (до сотен атмосфер) было нанесено в магнетронной распылительной системе (МРС) [20]. Нанесение покрытия осуществлялось в магнетронной распылительной системе, которая была смонтирована в вакуумной цилиндрической камере промышленной установки типа УВН, модернизированной в соответствии с задачами исследования. Для повышения сопротивления износу, ресурса и стойкости к задирам при больших контактных нагрузках (особенно при фреттинг-износе) и сопротивления усталости на рабочую поверхность подложек (диски размером $\varnothing 78 \times 10$ из стали 95X18) было нанесено покрытие из композиции нитрида титана и свинца распылением мозаичной мишени, представляющей собой диск $\varnothing 100$ мм, выполненный из титанового сплава с четырьмя вставками из свинца, равномерно расположенными на среднем диаметре мишени. Нанесённое композиционное ТСП содержало в своём составе нитрид титана и свинец при соотношении компонентов: нитрид титана - 90-95 %, свинец – 5-10 %. Перед нанесением покрытия поверхность подвергается абразивно-струйной обработке в атмосфере в защитной камере порошком корунда с размерами частиц < 10 мкм, ионному травлению в вакууме равномерным по плотности потоком ионов аргона с энергией до 1,5 кэВ. Длительность ионной очистки составляла 40 мин. для всех типов образцов и плёнок (ионный ток 140 мА, давление $P_{Ar} = 0,05$ Па). Были получены и испытаны два вида покрытий – покрытие из нитрида титана TiN_x и композиционное покрытие состава $TiN_x + Pb$. Суммарная толщина всех покрытий составляла 4,5-5,5 мкм. С использованием результатов предварительных триботехнических исследований и микротвёрдости покрытия TiN_x было установлено оптимальное массовое соотношение реакционного N_2 и рабочего Ar газов: $Q_{N_2}/Q_{Ar} = 0,55-0,63$, что соответствовало составу покрытия TiN_x при $X = 1,09-1,14$. Эти сверхстехиометрические покрытия TiN_x имели микротвёрдость H_{μ} на уровне 16-18 ГПа, и при триботехнических исследованиях продемонстрировали относительно высокие коэффициенты трения. Дополнительно состав и внутренние напряжения сверхстехиометрических плёнок TiN_x были исследованы на рентгеновском дифрактометре «RIGACU». Было установлено, что при изменении соотношения расходов азота к аргону от 0,46 до 0,73 параметр решётки изменяется линейно от $4,211 \text{ \AA}$ до $4,237 \text{ \AA}$, что соответствует линейному изменению стехиометрии от $TiN_{1,00}$ до $TiN_{1,17}$. Трибологические испытания проводились на машине трения УМТ-1 по схеме “палец-диск”, на рис. 5 представлены результаты испытания полученных покрытий, давление в контакте составляло 15 МПа, скорость 2,5 м/с.

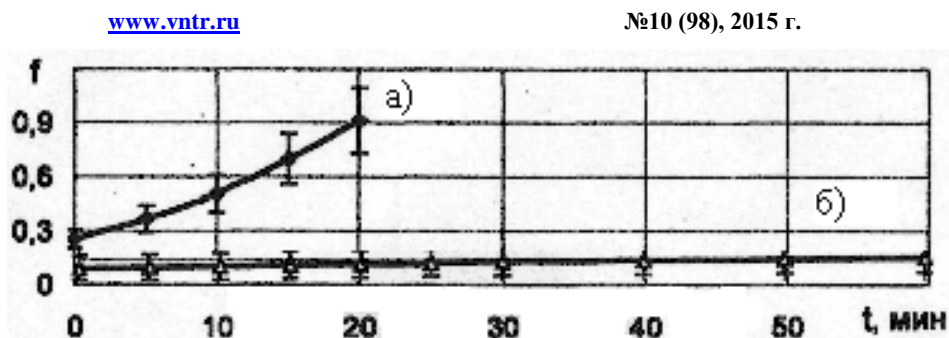


Рис. 5. Влияние состава композиций на трение ТСП на базе TiN: а) пленка TiN_x, б) пленка TiN_x+Pb

Как видно из диаграммы, триботехнические характеристики плёнки из чистого TiN_x (рис. 5а) являются неудовлетворительными: наличие большого коэффициента трения $f=0,4-0,9$ и его рост привели к тому, что эти испытания пришлось остановить из-за появления задиров/контртела о разрушаемый материал покрытия. Наилучший результат был получен для плёнки из композиции TiN_x+Pb (рис.5б) распылением из мозаичной мишени с одного магнетрона. Как видно, данная композиция продемонстрировала низкий коэффициент трения при 60- минутном испытании, наблюдалось хорошее скольжение поверхностей и отсутствие задиров. Испытания на усталость показали, что покрытие TiN_x+Pb на стали 440С не разрушилось даже после 10^7 циклов и продемонстрировало тенденцию к дальнейшей работе. Величина нагрузки составляла 1200-900 МПа, испытания проводились в среде жидкого азота при температуре 77К. *Микродуговое окисление*. Метод МДО был использован для формирования композиционного керамического покрытия на рабочей поверхности цилиндрической вставки ДВС алюминиевого сплава Д16 с последующим хонингованием. Режимы получения МДО покрытий представлены в табл.1

Таблица 1

Режимы формирования МДО покрытий

№№ образца	Состав электролита г/литр	J, А/дм ²	Напряжение		T, °C	τ, мин
			Катодное	Анодное		
14МАО	КОН-1+Na ₂ SiO ₃ -6	5	170	620	40	420
25МАО	КОН-1+Na ₂ SiO ₃ -10	4	160	600	35	480
29МАО	КОН-2+Na ₂ SiO ₃ -8	6	240	700	40	450
30МАО	КОН-2+Na ₂ SiO ₃ -2+NaAlO ₂ -2	6	140	580	45	450

Испытания на трение и износ проводились на специализированной исследовательской установке, довольно точно воспроизводящей возвратно-поступательное движение, совершаемое поршнем в ДВС [9]: при относительно низкой скорости и максимально возможной нагрузке, т.е. условиях, моделирующих граничное трение между цилиндром и поршневым кольцом трение в ДВС. Параметры этого воспроизведения включали: скорость двигателя в диапазоне 100-600 об/мин, нагрузку на поршневое кольцо от 0 до 35 кг, вязкость используемых масел фирмы Shell в диапазоне температур 40-100°С составляла величины от 25 до $40 \cdot 10^{-2}$ пз. Сегменты образца, настоящего кольца и цилиндра с МДО покрытием имели форму и размеры, близкие к реальным. Длина хода поршня составляла 77 мм.

Результаты сравнения коэффициентов трения, полученных на образцах с МДО покрытиями, с образцами, вырезанными из чугунных цилиндров при скоростях 200, 400 и 600 об/мин, представлены на рис.6. Эти испытания были проведены с использованием масла SAE-SW30 при давлении на поршневые кольца $p = 1,05 \text{ кг/см}^2$. Режим трения при этих условиях, по оценкам, соответствует границе смешанного и граничного трения на диаграмме Штрибека (рис.1).

Как следует из рис.6, все чугунные образцы демонстрируют классическое поведение в режиме граничного трения и имеют коэффициент трения $\geq 0,145$ в районе верхней мертвой точки ВМТ (0°) и нижней мертвой точки НМТ (180°) угла поворота коленчатого вала и нулевой скорости поршня. Коэффициент трения постепенно приближается к наиболее низкому значению $f \approx 0,13$. Эти значения согласуются с опубликованными в литературе сведениями относительно чугуна.

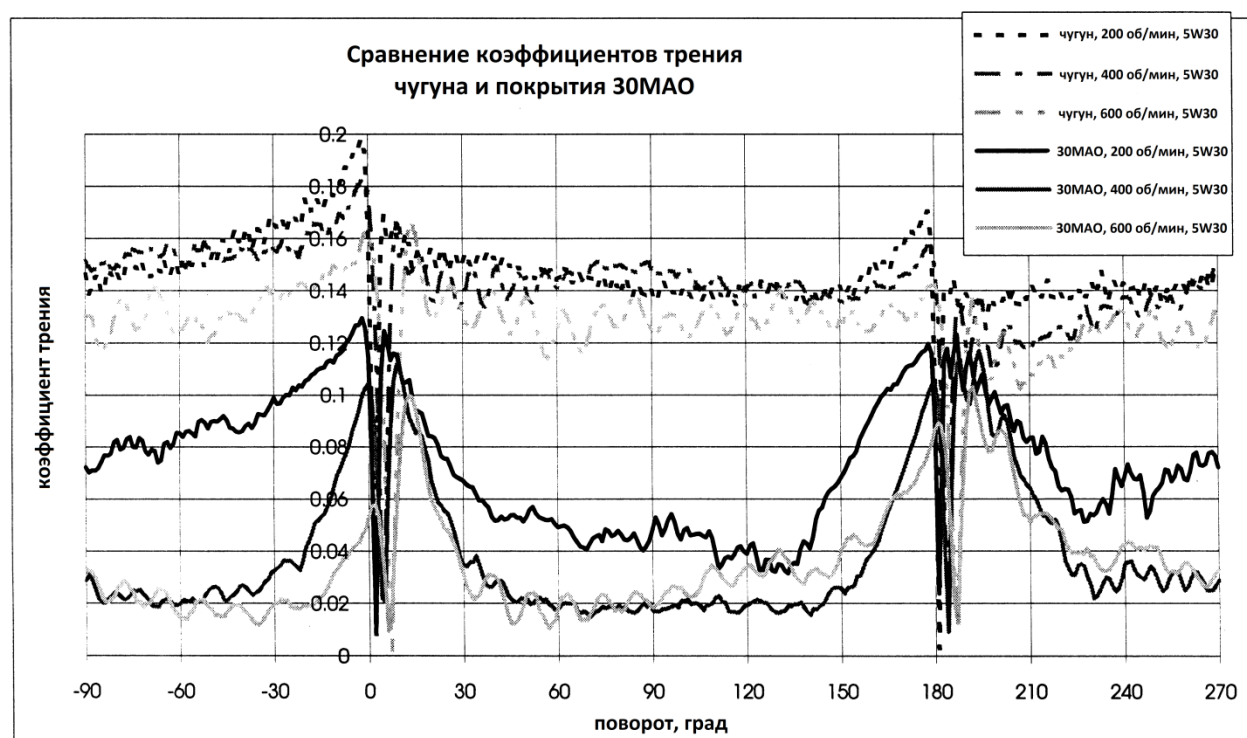


Рис.6. Сравнение трения чугунных и МДО сегментов со смазкой 5W30

Все МДО покрытия показывают коэффициенты граничного трения приблизительно равные 0,12-0,13 возле НМТ и ВМТ при приблизительно нулевой скорости поршня. Когда поршень разгоняется, и при 15° - 30° угла поворота коленчатого вала коэффициент трения образца 30MAO (рис.9) резко падает до значения $\sim 0,02$ при 400 об/мин и $\sim 0,045$ при 200 об/мин, достигая этого минимума при 45° - 135° . Процесс идет в обратном направлении, когда скорость движения поршня падает до нуля при НМТ. Такое поведение поверхностей с MAO покрытиями при трении согласуется с качественными представлениями, иллюстрируемыми диаграммой Штрибека (рис.1). Коэффициент граничного трения, по существу коэффициент трения твердой смазки f_s , значительно больше, чем коэффициент гидродинамического трения при традиционных смазках, используемых в ДВС при нормальных рабочих температурах. Абсцисса $\mu V/p$ является безразмерным параметром и характеризует проявление толщины масляной пленки. Слева при особо высоких нагрузках ($1/p \rightarrow 0$) или при очень низкой вязкости μ масла или при низких скоростях V , когда устойчивое образование масляной пленки невозможно, трение полностью зависит от величины коэффициента трения f_s скользящих друг относительно друга материалов.

При движении вправо устойчивые типы масляных пленок и высоты шероховатостей будут определять с учетом значения параметра λ величину силы и коэффициента трения. Поэтому, как шероховатость поверхности, так и текстура (пористость, отдельные поры и т.п.), также определяющая высоты шероховатости, будут влиять на характер обобщенной кривой S . Используемые в нашем случае для сравнения образцы из чугуна имели шероховатость Ra 0,4-0,6 мкм и в образованных бороздках находилось масло, которое способствовало снижению нагрева трущихся поверхностей и предотвращению появления задиров и царапин. Режим трения в этом случае для чугуна находится в "смешанной" зоне, где преобладает компонент граничного трения, а гидродинамический компонент сравнительно мал. Это условие наиболее характерно для верхнего масляного кольца при начале его движения с большой скоростью от ВМТ после зажигания. Как показывает анализ цилиндров реальных ДВС, наиболее высокий износ и приходится именно на место верхней части хода поршня, как этого следует ожидать из результатов проведенного анализа.

В случае рассматриваемого образца 30МАО, несмотря на его гладкую отполированную поверхность после хонингования, её текстура оказалась более пористой, чем у других образцов (табл.1), и из-за этого высота шероховатости a представляется большей, и кривые трения более похожи на кривые для чугуна, только коэффициенты трения значительно ниже. Увеличение скорости работы двигателя при трении на этих покрытиях с маслом 5W30 при скоростях 200, 400 и 600 об/мин в сравнении с образцами из чугуна показал (рис.9), что при увеличении скорости V режим трения становится приближается к гидродинамическому, как и следует из диаграммы Штрибека (рис. 1).

МДО покрытия продемонстрировали намного более низкие коэффициенты трения, чем чугун, и более низкий износ [9]. Равномерно распределенная пористость переходного слоя МДО покрытия с более высокой твердостью ($H_{дв}$ в диапазоне 1000-2000 кг/мм²) открыла возможность для пропитки этого покрытия маслом, и особенно, твердой смазкой, чтобы избежать износа поршневого кольца и привести к дальнейшему уменьшению трения и повышению ресурса такого трибосопряжения.

Проведённый анализ возможностей неорганических ТСП и современных плазменных методов их формирования, а также результаты исследования их триботехнических характеристик в различных условиях нагружения позволяют рекомендовать опробованные методы конструирования покрытий и технологии их получения для дальнейшего совершенствования с целью обеспечения ресурса и надежности рабочих контактных поверхностей тепловых двигателей и энергоустановок в различных условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.577.21.0100 от 16 сентября 2014 г. (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0100) о предоставлении субсидии, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Семенов А.П. Создание износостойких и антифрикционных покрытий и слоев на поверхностях трения деталей машин новыми методами// Трение и износ, 1982. Том III, № 3. С. 401-411.
2. Holmberg K., Matthews A. Coating Tribology. Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands 1994. 442 p.
3. Lesnevskiy L. Plasma coating. State of art// Report at SEP-MAI Contract № 29-93. M. MAI, 1993. 166 p.
4. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ягодкин Ю.Д. Технология плазменных покрытий в производстве энергетических и двигательных установок// Учебное пособие. –М.: Изд-во МАИ, 1994. 80 с.

5. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н. Вакуумно-плазменные методы обработки поверхности в производстве двигательных и энергетических установок// Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2001. 44 с.
6. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радиосвязь, 1982. – 72 с.
7. Krishtal M.M., Chudinov V.A., Pavlikhin S.E., Plunin V.I. A wear-resistant coating for aluminium-silicon alloys using microarc oxidation and an application to aluminium cylinder block, SAE Paper No 2002-01-0626, 2002. – 10 p.
8. Криштал М.М., Ивашин П.В., Коломиец П.В. Использование технологии микродугового оксидирования при разработке ДВС с блоком цилиндров из алюминиевого сплава // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2010. Т. 12, № 4. – С. 242-246.
9. Rao V.D.N., Cikanek H.A., Lesnevskiy L.N., Tchernovskiy M.N., Turin V.N. Friction and Wear Characteristics of Micro-Arc Oxidation Coating for Light Weight, Wear Resistant Powertrain Component Application, SAE Paper No 970022, 1997. – 16 p.
10. Heywood J.V. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGrawHill. 1988. 575 p.
11. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1968. – 480 с.
12. Добычин М.Н., Ляпин К.С. Вопрос о расчетно-экспериментальном методе определения коэффициентов трения// В книге "О природе трения твердых тел". – Минск.: Наука и техника, 1971. – 472 с.
13. Рабинович Э. Зависимость трения и износа твердых смазочных пленок от их толщины// Перевод с англ. № 79/48228. ASLE Transaction, 1967. V. 10, № 1. P. 1-9
14. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с
15. Свириденко А.И., Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
16. Bowers R.C., Zisman W.A. Pressure effects on the friction coefficient of thin film solid lubricants// J. Lubr. Eng., 1968. V. 39, № 12. P. 73-79.
17. Крагельский И.В., Михин Н.М. О влиянии природы твердых тел на внешнее трение, о соотношении между адгезионной и объемной составляющими// составляющими// В сборнике "Теория трения и износа". – М.: Наука, 1965. – 365 с
18. Лесневский Л.Н., Трошин А.Е., Тюрин В.Н., Ушаков А.М. Твёрдые смазочные покрытия узлов трения авиационных двигателей нового поколения // Сборник тезисов III Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века», М.: ЦИАМ. 2010. Электрон.опт.диск (CD-ROM).
19. Y.Raz, S.Dirnfeld Plasma Arc Spraying of Ti-6Al-V with CuNiIn // Surface Engineering, 1990. V.6, N2. P.121-129
20. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ушаков А.М. Способ формирования композитных твёрдосмазочных покрытий на рабочих поверхностях узлов трения. Патент на изобретение №2416675, 2011. – 7 с.