

УДК 621.45.038.7

РАЗРАБОТКА ПОКРЫТИЙ ТИПА «ТВЕРДАЯ СМАЗКА» ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© Л.Н. Лесневский

Московский авиационный институт, Москва, Россия

В последние годы возрос интерес к твёрдым смазочным покрытиям и плёнкам (ТСП) применительно к экстремальным условиям эксплуатации. В работе представлены результаты исследований и разработок ТСП, полученных методами плазменного напыления, магнетронного осаждения и микродугового оксидирования для использования в узлах трения двигателей и энергоустановок. Показана эффективность этих методов для формирования ТСП.

Ключевые слова: *покрытия, плёнки, твёрдая смазка, твёрдые смазочные покрытия (ТСП), двигатели, энергоустановки, методы плазменной технологии, ресурс, надёжность.*

Development of coatings type of “solid lubricant” for engines and power plants of flying vehicles

© L.N. Lesnevsky

In recent years, the interest to solid films lubricant (SFL) in respect to extreme conditions of operation have increased, considerably. In this paper the results of researches and developments SFL, obtaining by plasma spraying, magnetron sputter deposition and micro-arc oxidation methods for engines and power plants frictional units are presented. Efficiency of these methods for SFL forming is shown.

Coatings, films, solid lubricant, solid film lubricant (SFL), engines, power plants, plasma technology methods, lifetime, reliability.

В настоящей работе приведены результаты разработки и исследования твёрдых смазочных покрытий (ТСП) применительно к узлам трения двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. В этом случае ТСП принято использовать:

- самостоятельно при высоком вакууме, жёсткой радиации и невесомости, в вакууме, при экстремально высоких и низких температурах, при больших нагрузках с низкими скоростями скольжения, в активной коррозионной среде;
- в комбинации с обычной жидкой смазкой (или пропиткой) для облегчения останова и пуска, особенно при низких начальных скоростях скольжения.

ТСП разных типов широко используются в авиационных и космических механизмах, что обусловлено жесткими, экстремальными условиями их эксплуатации [1]. Формы контактов и их движения чрезвычайно разнообразны: силовые возвратные пневматические и гидравлические приводы (цилиндры), механизмы щитков, червячных приводов, регулирующие клапаны, вращающиеся уплотнения, механизмы качания, поворота, развертывания, причаливания, различного вида резьбовые соединения и многие другие.

С учетом этого разнообразия для каждого конкретного случая приходится подбирать моделирующую контакт пару трения, для которой проводятся оценочные расчеты, с учетом которой проектируется экспериментальный узел для испытаний на трение и износ для заданных условий эксплуатации. При этом необходимо, чтобы геометрия поверхности пары трения экспериментального узла была максимальным образом приближена к реальной конструкции. Поэтому при испытаниях на трение и износ приходится не только модернизировать универсальные машины, но и проектировать специализированные машины трения.

Исходя из анализа основных областей применения ТСП, их преимущества заключаются в том [2], что они не собирают грязь, могут быть использованы при высоких нагрузках на узлы трения, обеспечивают стабильное и длительное хранение (функционирование с большими интервалами). Использование ТСП позволяет проектировать и создавать конструкции таких узлов без масляной системы, более лёгкие по весу и простые, с меньшим количеством уплотнений, подшипники могут в этом случае располагаться ближе к источникам тепла, что позволяет использовать более короткие валы. Такие покрытия отличает хорошая стабильность во вредной окружающей среде.

Однако, наряду с очевидными достоинствами ТСП известны их недостатки, к которым принято относить: плохое рассеяние тепла по сравнению с жидкой смазкой, относительно низкую теплопроводность, сравнительно невысокую долговечность, затруднённую восстанавливаемость после повреждения, отсутствие хорошей амортизации при осциллирующих нагрузках и, наконец, сильную зависимость ресурса ТСП от их толщины и условий эксплуатации.

В работе рассмотрены возможности и приведены результаты применения для формирования ТСП в основном плазменных, и на наш взгляд, наиболее перспективных методов, реализуемых: в атмосфере (плазменное напыление – APS с использованием установки Sulzer-Metco M1000 с TWIN-10 с питателями «Plasmadyne»), в вакууме (осаждение в магнетронной распылительной системе - MSpD с использованием модернизированной установки типа УВН) и в электролите (микродуговое оксидирование – МДО на изготовленной своими силами установке МАИ-205). При этом подбор компонентов и составов ТСП для заданных экстремальных условий их эксплуатации, а также выбор плазменной технологии и режимов их формирования осуществлялось при условии минимизации или полного исключения перечисленных выше недостатков ТСП с сохранением их достоинств [3].

Анализ материалов, используемых в составе ТСП для различных целей, но близких по условиям эксплуатации к двигателям и энергоустановкам ЛА, а также технологической оснастки, используемой при их изготовлении, показал, что трибологическое поведение покрытий определяется не только материалом и технологией их получения, но и конструкцией ТСП. Проектирование ТСП должно осуществляться с учетом условий работы контакта трения и возможностей обоснованно выбранного метода формирования покрытия. На основании этого анализа была рассмотрена схема (рис. 1), позволяющая представить картину взаимодействия основных процедур проектирования и формирования требуемой системы покрытия ТСП.



Рис. 1. Взаимодействие основных этапов разработки конструкции ТСП

Очевидно, что анализ взаимодействия основных этапов формирования системы ТСП начинается с изучения основных условий контакта трения, при этом важно принимать во внимание его вид, характерный для узлов двигателей и энергоустановок ЛА: при скольжении, при качении, при фреттинге и т.п. Вид контакта при таком рассмотрении почти однозначно предопределяет вид износа. Далее следуют традиционные этапы: обоснованного выбора материала (состава) покрытия и используемой технологии.

Одной из первых разработок, которая получила практическое приложение, была разработка ТСП для рабочих поверхностей колец уплотнения криогенного насоса турбонасосного агрегата. На основе сравнительных испытаний из нескольких композиционных, плакированных Ni и Cu порошков ([Cg]Ni, [BN]Ni, [CaF₂]Ni, [Cg]Cu) для дальнейших исследований был отобран порошок никель-графит (графит плакированный никелем) Cg]Ni, предварительно показавший наилучшие результаты по трению и износу (скорость 3 м/с, нагрузка 30 кгс, испытания по схеме «палец-диск»). В данном случае покрытия на основе порошка никель-графит использовались не в традиционном качестве конструкционного «срабатываемого» покрытия, а как ТСП.

Разработка опытного технологического процесса включала в себя: подбор подслоёв (был выбран подслои NiAl), определение режима их формирования методом плазменного напыления и исследование (с помощью анализа оже-спектров поверхностей) влияния режимов струйно-абразивной обработки на эффективность разрушения окисной плёнки и оценку времени «пролёживания» образцов. Для улучшения противоизносных свойств таких ТСП, формируемых на основе [Cg]Ni, обоснованно был выбран порошок, в котором плакирование никелем осуществлялось осаждением его из газовой фазы, а не в электролитической ванне. Кроме того, полученные ТСП были уплотнены, как с использованием холодного обжатия давлением до 350 МПа, так и методом газового изостатического прессования (ГИП) в газостате «Crucible». Твёрдость ТСП на основе [Cg]Ni в результате обработки ГИП была увеличена с 0,6 – 1,2 до 6 – 12 МПа.

Проведённый с использованием рентгеновского микроанализатора «Camebax-MBX» анализ распределения элементов по толщине покрытия до и после ГИП позволил выделить в нём зоны термического влияния с обеднением и обогащением по углероду, оказывающие влияние на характер «приработки» этих покрытий. Дополнительно, были уточнены и рекомендации по выбору подслоёв и для высокотемпературных (испытания были проведены до температуры 770⁰С) условий применения ТСП на основе [Cg]Ni. Вместо подслоя из NiAl для высокотемпературных условий был рекомендован подслоем из нихрома NiCr.

Сформированные на основе [Cg]Ni ТСП, нанесённые на внутренние поверхности колец уплотнения криогенного насоса для следующих условий эксплуатации: контрдеталь из анодированного алюминия с повышенной микротвёрдостью до 400 HV, диапазон температур работы пары трения от 213 К до 1073 К и термоциклирование (не менее 100 циклов) в этом диапазоне температур. Кольца успешно отработали в составе турбонасосного агрегата. Разработанные покрытия позволили повысить ресурс, работоспособность и надёжность колец уплотнения, устранили появление дефектов на контактирующих поверхностях и сняли ограничения по времени работы и количеству запусков изделия.

Проведённые исследования позволили, но теперь с учётом анализа механизма фреттинг-износа, разработать технологический процесс плазменного напыления ТСП на основе порошка никель – графит Ni[Cg] ПНГ - 80 (20% графита, 80% никеля) на рабочие поверхности образцов, моделирующих узлы трения замков вентиляторных лопаток авиационных двигателей новых поколений. Контртела изготавливались из нержавеющей стали и стали ШХ-15. Подбор композиций ТСП и конструкции покрытий осуществлялись на роликовой машине трения РМТ-1 с определением характеристик массового уноса и коэффициента трения.

Окончательно была выбрана конструкция ТСП, как многослойное твёрдосмазочное покрытие с рабочим слоем на основе никель-графита Ni[Cg] и эпоксидного лака с MoS₂, модифицированным пропиткой суспензией коллоидно-углеродного раствора, содержащего наночастицы графита размерами до 100 нм. Испытания на износ такой послойной композиции: NiAl (как подслоя)-CuNiIn-Ni[Cg]-MoS₂-пропитка коллоидным графитом осуществлялось с использованием специально спроектированной и изготовленной машины трения, обеспечивающей моделирование условий фреттинг-износа в узлах трения замков вентиляторных лопаток, а именно, возвратно-поступательное движение образцов с амплитудой 0,1...2 мм при нагрузке до 600 МПа и частоте более 10 Гц при температуре окружающей среды (воздуха) 20⁰С.

Дополнительно были проведены исследования по выявлению особенностей фреттинг - износа образцов с ТСП: определялась глубина пластической и упругой деформации покрытия при внедрении в него контртела, измерялся профиль износа ТСП на образцах после испытаний на машине трения, изучалась динамика изменения глубины износа ТСП и оценивалась скорость его износа. Структура этого покрытия и зависимость скорости его износа (а также износа других вариантов ТСП для заданных условий эксплуатации) от времени представлены соответственно на рисунках 2 и 3.

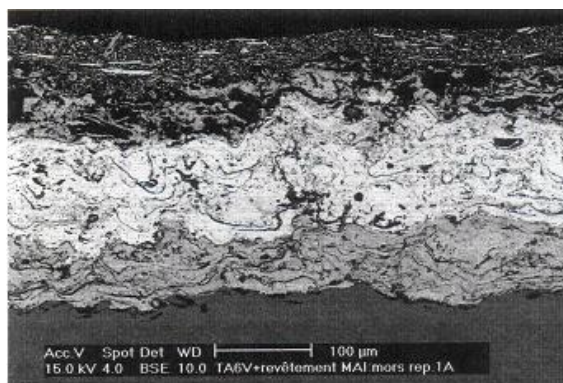


Рис. 2. Структура многослойного покрытия NiAl-CuNiIn-Ni[Cg]-MoS₂-колл. [Cg]

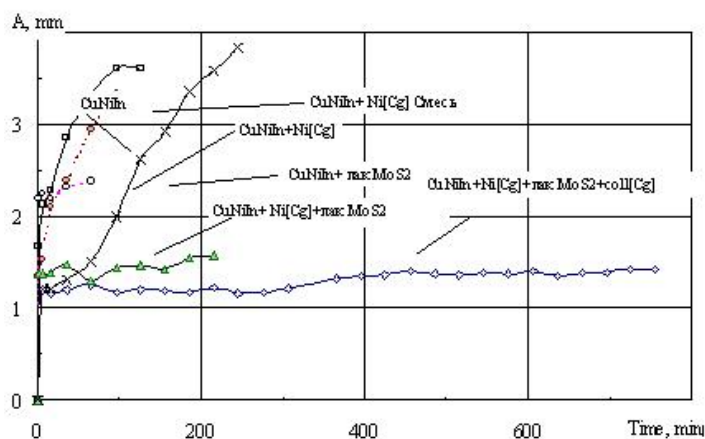


Рис.3. Сравнительный износ покрытия CuNiIn +ТСП по времени (>10 часов)

Сформированное таким образом покрытие эффективно отработало в условиях фреттинг-коррозии замковой части вентиляторной лопатки технологического авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) более 10⁴ часов без разрушения.

Для разработки и исследования ТСП, получаемых в магнетронной распылительной системе (MSpD) [3,4], были рассмотрены другие материалы покрытий, обладающие высокой твердостью при работе в условиях высокой температуры до 600°C. Катоды-мишени, из материала которых осуществлялось осаждение покрытий, представляли собой диски, толщиной 3 мм, устанавливались на водоохлаждаемом катодном блоке с постоянными магнитами. Они были изготовлены методами порошковой металлургии из TiN, TiCN, Cr₃C₂ и твердого раствора TiB₂+TiC. Поскольку нанесение покрытия на этом начальном этапе исследования осуществлялось распылением мишеней ионами аргона, то для проверки стехиометрического состава сформированных покрытий и определения их структуры и фазового состава был использован рентгеноструктурный анализ. По результатам анализа четырех соединений: Cr₃C₂, TiN, TiB₂+TiC, TiCN было установлено, что в процессе магнетронного распыления материала мишени стехиометрический состав распыляемых частиц и, соответственно, покрытия полностью сохраняется. Фазовый состав мишеней и покрытий был также идентичен и соответствовал составам распыляемых соединений. Наряду с рентгеноструктурным анализом, на образцах

свидетелях для этих же материалов проводился металлографический анализ с целью определения микротвердости H_{μ} (прибор ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,5 Н) и толщины δ (на поперечных сколах при помощи микроскопа МИИ-4) нанесенных покрытий. Результаты измерений представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства покрытий

Свойства покрытий и время нанесения (мин)	Состав покрытий			
	Cr_3C_2 ,	TiN	TiB ₂ +TiC	TiCN
Толщина δ , мкм	10	9	8	7
Микротвердость H_{μ} , ГПа	13,2	19,6	30,4	17,7
Время, мин	20	30	50	40

Как видно, микротвердость нанесенных покрытий существенно превышает микротвердость большинства гальванических покрытий и одного порядка с композиционными гальваническими покрытиями. Результаты триботехнических испытаний этих покрытий (машина трения УМТ-1, схема «кольцо-кольцо», материал колец диаметром $\varnothing 46$ - сталь ВНС-16, усилие прижима – 500Н, скорость вращения патрона – 6-75 об/мин) для температуры нагрева - 400⁰С представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Эксплуатационные свойства покрытий

Свойства покрытий при температуре 400 ⁰ С	Состав покрытий			
	Cr_3C_2 ,	TiN	TiB ₂ +TiC	TiCN
Путь трения, м	380,3	402,9	402,9	383
Коэффициент трения	0,56	0,4	0,22	0,49
Интенсивность массового износа покрытия, 10 ⁻⁵ г/м	9,28	4,26	15	16

В результате анализа полученных физических и эксплуатационных свойств рассмотренных кандидатных покрытий при температуре 400⁰С (испытания были продолжены до 600⁰С) было установлено, что покрытие из карбонитрида титана имеет удовлетворительные антифрикционные и противоизносные свойства и может рассматриваться для использования при разработке узлов трения, работающих в условиях высоких температур (выше 200⁰С). Однако, учитывая удовлетворительные противоизносные свойства покрытия из TiN и приемлемый коэффициент трения, которые демонстрирует это покрытие для наиболее распространенных условий эксплуатации ($\leq 200^{\circ}C$), достаточно высокую твердость $H_{\mu} = 19,6$ и простоту получения и управления свойствами покрытия, особенно при реактивном магнетронном осаждении, для дальнейших исследований был выбран TiN. С учётом выбора более вязкого покрытия из экспериментально полученной зависимости микротвёрдости TiN от соотношения расходов $\varnothing N_2/\varnothing Ag$ (реакционного N₂ и рабочего Ag газов) был выбран рабочий диапазон этого соотношения равный 0,55-0,63, этому же диапазону соответствовали и минимальные значения предварительных экспериментальных оценок коэффициента трения. Толщина

сформированного покрытия из TiN составляла 3,8 мкм, температура подложки при формировании TiN не превышала значения 200⁰С.

Результаты анализа химического состава покрытия, полученные на электронном спектрометре XSAM-800 «Kratos» и рентгеновском спектрометре RIGACU, показали, что полученные плёнки TiN_x сверхстехиометрические, т.е. X=1,09-1,14. Сравнение полученных в работе плёнок TiN с плёнками, сформированными методами IBAД и САД, показало, что плёнки TiN, полученные в магнетронной распылительной системе в рамках настоящей работы, имели максимальное объёмное содержание TiN в своём составе (89%) и обладали наилучшими трибологическими свойствами. Трибологические испытания были проведены для этих покрытий, сформированных на титановых сплавах, сталях и керамике Si₃N₄, специальное исследование было посвящено плёнкам TiN в композиции с мягким металлом – свинцом Pb. Эти последние плёнки, полученные методом распыления из мозаичной мишени из Ti со вставками из Pb были подвергнуты трибологическим испытаниям на машине трения по схеме «палец-диск» (давление 15 МПа, скорость 2,5 м/с). Эта композиция при испытаниях в атмосфере при нормальных условиях позволила получить наиболее низкий для TiN коэффициент трения ~0,1, и износостойкость такого покрытия по сравнению с TiN оказалась выше. Испытание композиции TiN+Pb на фреттинг-износ в среде жидкого азота и усталостные испытания также подтвердили высокую надёжность этой композиции, плёнка продолжала успешно работать и после выработки заданного ресурса в 10⁶ циклов. Диаграмма относительного износа покрытий на базе TiN и результаты усталостных испытаний представлены на рис 4 и 5, соответственно.

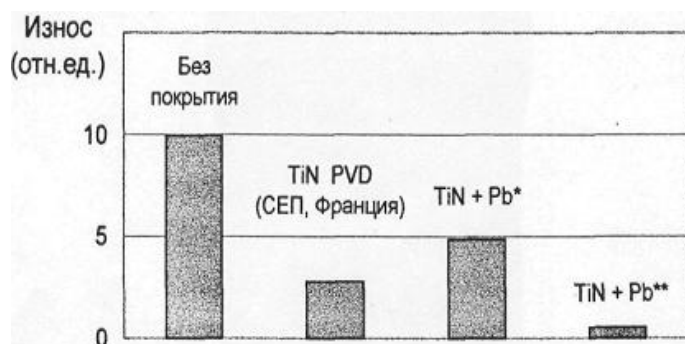


Рис. 4. Износостойкость стали 440С с покрытиями TiN и TiN+Pb (P=1МПа, V=1м/с, t=40 мин, f=0,08-0,1 для TiN+Pb)

Полученные результаты были использованы для защиты от износа опорных колец импульсных торцевых уплотнений ракетного двигателя, а также были предложены в качестве кандидатных для использования, как на рабочих поверхностях торцевых уплотнений газотурбинных установок и двигателей, так и для защиты от фреттинг-износа.

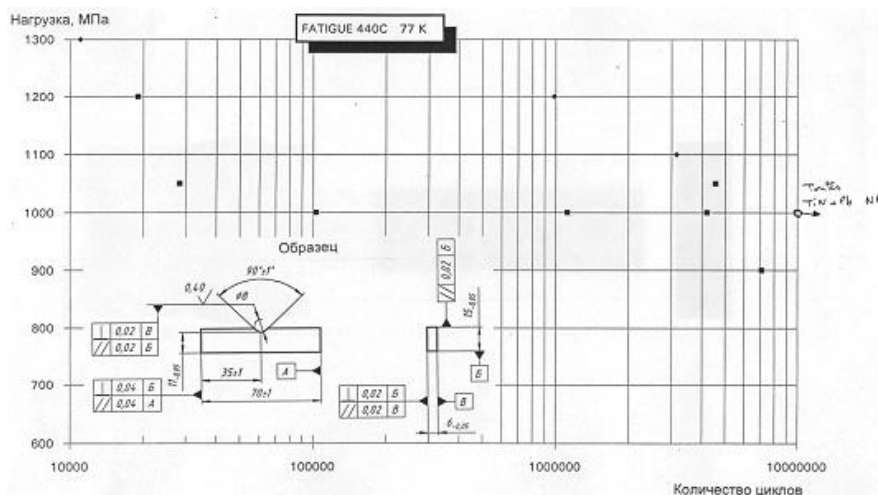


Рис. 5. Результаты испытаний на усталость образцов с покрытиями TiN и TiN+Pb

Для формирования ТСП в электролите был развит и использован метод МДО применительно к задаче повышения фреттингостойкости алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg (сплав AU4G, стандарт Франции) [3]. Оценка МДО-покрытия, основу которого составляет окись алюминия Al_2O_3 , также проводилась на специализированной машине трения, моделирующей фреттинг, с частотой 10 Гц, с амплитудой до 2-х мм при силе прижатия 80 Н и температуре $20^{\circ}C$. Было обнаружено, что скорость износа этого покрытия после небольшого периода обкатки монотонно возрастает, достигая значения $646,7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{час}$ (как это показано на рис.6) после испытаний в течение 4-х часов.

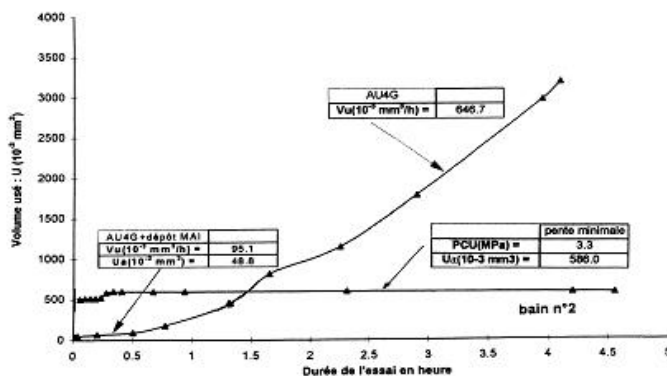


Рис. 6. Износостойкость МДО-покрытий при фреттин

МДО-покрытие, полученное в режиме, при котором в составе электролита присутствовали специальные солевые добавки (бораты), относительно быстро изнашивалось в период обкатки, но затем износ достигал значения $586 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$, которое уже не изменялось, т.е. скорость износа оставалась постоянной в течение 5-ти часов испытаний (рис.6). Таким образом, было установлено, что управляя составом электролита можно получать малоизносные ТСП.

Другой цикл исследований, проведённых по формированию МДО-покрытия на алюминиевом сплаве системы Al-Mg-Fe (сплав 6061, стандарт США), позволил получить новые результаты по применению этого сплава с покрытием для изготовления гильз цилиндров авиационных и автомобильных ДВС [5]. Образец представлял собой цилиндр диаметром $\varnothing 90$ мм и длиной 180 мм, на внутренней поверхности которого было сформировано МДО-покрытие, обработанное затем хонингованием до толщины 50-70 мкм. Испытания на трение и износ также проводились на специализированной машине трения, моделирующей работу пары трения «поршневое кольцо-гильза цилиндра».

МДО-покрытие в комбинации с графитовой смазкой или вязким маслом SAE SW 30, показало, как это видно на рис. 7, намного более низкие значения коэффициента трения (до 0,02) в отличие от чугуна (0,14) при более низком износе в одинаковых условиях испытаний (скорость 100-600 об/мин, нагрузка 0-35 кгс).

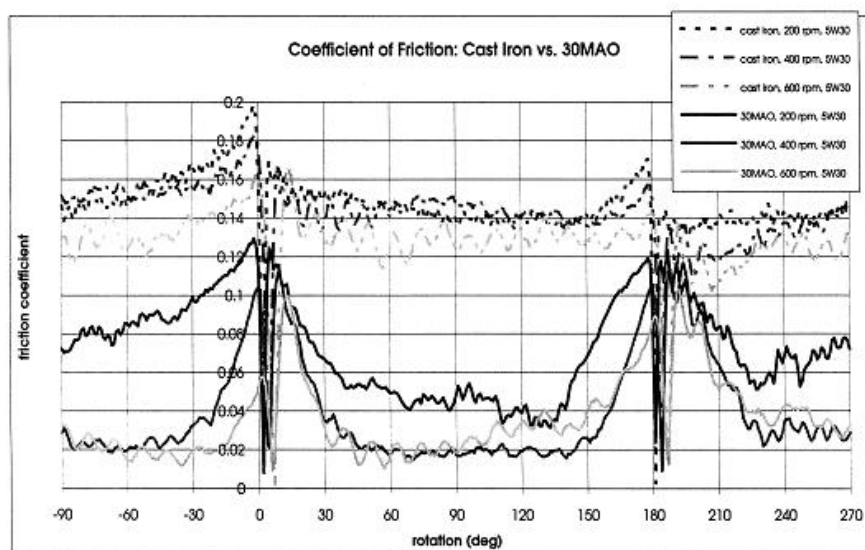


Рис. 7. Изменение коэффициентов трения по углу поворота коленчатого вала

Проведенный в настоящей работе анализ получения и применения ТСП, сформированных применительно к узлам трения авиационных и ракетно-космических двигателей и энергоустановок, показал, что трибологическое поведение ТСП для заданных условий эксплуатации и их свойства определяются не только материалами (компонентами), используемыми для их формирования, но и, в значительной степени, конструкцией ТСП, формируемых перспективными методами плазменных технологий.

Литература

1. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. –М.: Машиностроение, 1986. 224с.
2. Holmberg K., Mattews A. Coating Tribology. Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Science B.V., 1994. 442 p.
3. Lesnevskiy L.N. Plasma Technology of SFL for Aircraft Engine Lifetime Providing. SNECMA-Russia Technical Center: Lifetime Management Seminar. Moscow, 2000. 16 p.
4. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ушаков А.М. Анализ возможностей использования магнетронных распылительных систем (МРС) для получения твёрдых смазочных плёнок. Труды 9-й Международной конференции «Плёнки и покрытия-2009». С.197-198.
5. Rao V.D.N., Cikanek H.A., Boyer B.A., Lesnevskiy L.N., Tchernovskiy M.N., Tyurin V.N. Friction and Wear Characteristics of Micro-Arc Oxidation Coatings for Light Weigth Wear Resistant Powertrain Components. SAE Paper, № 970022, 1997. 15 p.

Поступила: 01.12.10.